EL ÁRBOL URBANO COMO INFRAESTRUCTURA VIVA

Bases científicas para la gestión y evaluación del riesgo arbóreo en la **Ciudad de Panamá**

BIOLOGÍA Y FISIOLOGÍA
Crecimiento, adaptación y respuesta al estrés

BIOMECÁNICA Y ESTABILIDAD
Cargas, tensiones y resistencia estructural

SISTEMA RADICULAR
Anclaje, suelo, agua y nutrientes

EVALUACIÓN DEL RIESGO
Detección, análisis y toma de decisiones (Método CODIT)

MANEJO Y CONSERVACIÓN
Intervenciones técnicas y buenas prácticas

CIENCIA
NATURALEZA
CIUDAD

INFRAESTRUCTURA VERDE
Conectividad ecológica y planificación urbana

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS
Calidad del aire, regulación térmica e interceptación de agua lluvia

EVALUACIÓN Y RIESGO
Reducción de fallas y protección de la vida y la propiedad

MANEJO SOSTENIBLE
Poda, plantación y mantenimiento adecuado

GOBERNANZA Y NORMATIVA
Marco legal, políticas públicas y participación ciudadana

LOURDES RUBATINO SANTIZO
• FARNUM FRANCISCO •
EDGARDO GUTIÉRREZ V.
WENDY REQUENA F.

FOTOGRAFÍA:
ANDREI VOROTNIKOV

10.69821/978-628-97750-2-0

El árbol urbano como infraestructura viva:

Bases científicas para la gestión y evaluación del riesgo arbóreo en la Ciudad de Panamá

Primera publicación: julio, 2026

De esta edición:

Fondo Editorial PLAGCIS, adscrito a la Plataforma de Acción, Gestión e investigación Social S.A.S.

Calle 13B 12-74, Sincelejo - Colombia

Tel.: +57 301 498 9039; director@plagcis.org / www.plagcis.org

Universidad INCCA de Colombia

Cra 13 # 24-15, Bogotá – Colombia

Tecnológico Universitario Edupraxis

Juan Benigno Vela 07-56 y Montalvo. Ambato – Ecuador.

Esta publicación es el resultado de investigación bajo el auspicio de la Plataforma de Acción, Gestión e investigación Social S.A.S – (PLAGCIS) en alianza con la Universidad INCCA de Colombia bajo el convenio marco de cooperación, firmado el 18 de junio del 2025 y con el Tecnológico Universitario Edupraxis.

ISBN: 978-628-97750-2-0

DOI: 10.69821/ 978-628-97750-2-0

Acceso abierto / Open Access

10.69821/978-628-97750-2-0

El árbol urbano como infraestructura viva: Bases científicas para la gestión y evaluación del riesgo arbóreo en la Ciudad de Panamá / Lourdes Rubatino Santizo, Francisco Farnum Castro, Edgardo Gutiérrez y Wendy Requena: Universidad INCCA de Colombia, 2026, Tecnológico Universitario Edupraxis, 2026 & Plataforma de Acción, Gestión e Investigación Social S.A.S., 2026.

ISBN: 978-628-97750-2-0

256 páginas.

1. urbanismo, 2. desafíos ambientales, 3. infraestructura urbana, 4. cambio climático, 5. sostenibilidad, 6. Panamá

Materia: 711 - Planificación del espacio (Urbanismo)

Clasificación Thema: RPC - Planificación y gestión urbana y municipal

JBCT1 - Estudios sobre medios: internet, medios digitales y sociedad

Libro de investigación No. 64

Lourdes Rubatino Santizo

Francisco Farnum Castro

Edgardo Gutiérrez

Wendy Requena

Fotografía

Andrei Vorotnikov

Créditos fotográficos

La totalidad del material fotográfico incorporado en esta obra corresponde a Andrei Vorotnikov, salvo indicación contraria.

10.69821/978-628-97750-2-0

PRÓLOGO

Las ciudades contemporáneas enfrentan desafíos ambientales cada vez más complejos derivados del crecimiento urbano acelerado, la fragmentación del paisaje, la modificación de los ciclos hidrológicos y la intensificación de fenómenos asociados al cambio climático. Dentro de este escenario, el árbol urbano ha dejado de ser interpretado exclusivamente como un elemento ornamental o paisajístico para consolidarse como un componente funcional esencial de la infraestructura urbana contemporánea. Su capacidad para regular la temperatura, capturar carbono, interceptar escorrentía, mejorar la calidad del aire y sostener procesos ecológicos fundamentales lo posiciona como un elemento estratégico para la sostenibilidad y resiliencia de las ciudades.

Sin embargo, reconocer el valor ecosistémico del árbol urbano implica también comprender su naturaleza biológica y estructural. A diferencia de las infraestructuras convencionales, los árboles constituyen organismos vivos sometidos a procesos continuos de crecimiento, adaptación, envejecimiento y respuesta frente a condiciones ambientales cambiantes. En el entorno urbano, estos organismos desarrollan su ciclo de vida bajo condiciones frecuentemente restrictivas, caracterizadas por limitaciones del espacio radicular, compactación del suelo, conflictos con infraestructura construida y exposición a cargas dinámicas derivadas del viento y de eventos meteorológicos extremos.

En ciudades tropicales como la Ciudad de Panamá, estas condiciones adquieren una complejidad adicional debido a la interacción entre altas temperaturas, elevada humedad relativa, intensos eventos de precipitación y una dinámica urbana en constante transformación. Tales factores condicionan simultáneamente el comportamiento fisiológico y biomecánico del arbolado, generando escenarios donde la provisión de beneficios ecosistémicos coexiste con desafíos asociados a la estabilidad estructural, la seguridad pública y la gestión institucional.

Frente a esta realidad, la gestión del árbol urbano demanda un enfoque interdisciplinario que integre conocimientos provenientes de la fisiología vegetal, la biomecánica, la arboricultura moderna, la gestión del riesgo y la planificación territorial. Las decisiones relacionadas con poda, conservación, remoción, selección de especies o evaluación estructural requieren sustentarse en criterios científicos y metodologías consistentes que permitan equilibrar la seguridad pública con la conservación de la infraestructura verde urbana.

La presente obra surge precisamente bajo esta perspectiva integradora. Su propósito no consiste únicamente en describir procesos biológicos o presentar lineamientos técnicos aislados, sino en construir un marco conceptual y metodológico que permita comprender al árbol urbano como una infraestructura viva, dinámica y funcional. A lo largo de sus capítulos se desarrollan principios científicos relacionados con el comportamiento fisiológico y biomecánico del árbol, procesos de deterioro interno, evaluación estructural, análisis del riesgo arbóreo, criterios de intervención y aspectos asociados a la gobernanza y gestión institucional.

Asimismo, el contenido incorpora el contexto particular de la Ciudad de Panamá y el marco normativo que orienta la gestión local del arbolado urbano, permitiendo vincular principios científicos universales con realidades territoriales específicas. Esta integración busca fortalecer la aplicación práctica del conocimiento y facilitar la toma de decisiones basadas en evidencia técnica.

Más allá de constituir una recopilación de conceptos, este libro aspira a convertirse en una herramienta de consulta y apoyo para investigadores, estudiantes, profesionales, gestores municipales y todas aquellas personas interesadas en comprender y gestionar el arbolado urbano desde una perspectiva científica y sistémica.

El reconocimiento del árbol urbano como infraestructura viva implica reconocer que su conservación no depende únicamente de intervenciones puntuales, sino de una visión integral que articule conocimiento, planificación y responsabilidad

10.69821/978-628-97750-2-0

institucional. En última instancia, comprender al árbol dentro de la ciudad significa comprender que la sostenibilidad urbana y la calidad de vida futura estarán estrechamente vinculadas con la forma en que decidamos integrar y gestionar nuestros sistemas naturales dentro del entorno construido.

10.69821/978-628-97750-2-0

AGRADECIMIENTOS

Se expresa un profundo y especial agradecimiento al fotógrafo Andrei Vorotnikov, autor principal del material fotográfico incorporado en esta obra, por su invaluable contribución mediante la producción, aporte y cesión de imágenes que enriquecen significativamente el contenido del presente libro.

La documentación fotográfica constituye un componente esencial dentro de esta publicación, al permitir representar de manera visual procesos biológicos, estructurales y funcionales asociados al árbol urbano y su interacción con el entorno construido. Las imágenes incluidas no solo complementan la explicación técnica y científica desarrollada a lo largo de los capítulos, sino que también facilitan la interpretación y comprensión de conceptos relacionados con la fisiología, biomecánica, evaluación del riesgo y gestión del arbolado urbano.

Su sensibilidad artística, capacidad de observación y dedicación para capturar la relación entre naturaleza y ciudad han permitido fortalecer el valor académico, didáctico y visual de esta obra, aportando una dimensión adicional que integra ciencia y representación gráfica.

Se reconoce y agradece profundamente su colaboración, apoyo y valioso aporte a la construcción de este trabajo académico y científico.

10.69821/978-628-97750-2-0

PRESENTACIÓN

El árbol urbano constituye uno de los elementos más importantes dentro de la estructura ecológica de las ciudades contemporáneas. Su presencia trasciende la función ornamental tradicional y se integra como un componente estratégico capaz de contribuir a la regulación ambiental, la reducción de impactos climáticos y el fortalecimiento de la calidad de vida urbana. En este contexto, el reconocimiento del árbol como una infraestructura viva implica comprender que su manejo requiere fundamentos científicos, criterios técnicos y una visión integral que considere simultáneamente aspectos biológicos, estructurales, ambientales y sociales.

Durante décadas, la gestión del arbolado urbano en muchas ciudades ha estado sustentada principalmente en enfoques orientados a resolver conflictos inmediatos asociados a la interferencia con infraestructura, podas correctivas o respuestas ante eventos de falla estructural. Sin embargo, el crecimiento acelerado de las ciudades, el incremento de la presión sobre los espacios urbanos y los efectos asociados al cambio climático han puesto en evidencia la necesidad de avanzar hacia modelos de gestión más integrales y preventivos.

En la Ciudad de Panamá, la interacción entre condiciones climáticas tropicales, procesos de urbanización y limitaciones propias del entorno construido genera escenarios particularmente complejos para el establecimiento y permanencia del arbolado urbano. La elevada precipitación anual, los eventos de viento, las restricciones del espacio radicular y la coexistencia con infraestructura vial y de servicios condicionan tanto el desarrollo fisiológico como el comportamiento estructural de los árboles dentro del sistema urbano.

La presente obra surge como una respuesta a la necesidad de disponer de un documento técnico–científico que integre conocimientos provenientes de diversas disciplinas relacionadas con el estudio y manejo del árbol urbano. A lo largo de este libro se desarrollan fundamentos asociados a la fisiología vegetal,

biomecánica arbórea, procesos de deterioro, evaluación estructural, análisis del riesgo, criterios de intervención y elementos vinculados a la gobernanza y planificación urbana.

El contenido ha sido desarrollado bajo una perspectiva interdisciplinaria que busca articular principios científicos internacionales con las condiciones y particularidades propias de la Ciudad de Panamá. Esta aproximación permite contextualizar conceptos generales dentro de una realidad urbana específica y facilitar su aplicación práctica en procesos de evaluación y toma de decisiones.

Más allá de constituirse en una obra dirigida exclusivamente a especialistas, este libro ha sido concebido como un material de consulta y apoyo para estudiantes, investigadores, profesionales de las ciencias ambientales y forestales, gestores municipales, tomadores de decisiones y todas aquellas personas interesadas en comprender el papel que desempeña el árbol urbano dentro de la ciudad.

La comprensión del árbol como infraestructura viva representa un cambio conceptual importante dentro de la gestión urbana contemporánea. Implica reconocer que los árboles no son elementos aislados dentro del paisaje urbano, sino organismos dinámicos que interactúan constantemente con el suelo, la atmósfera, la infraestructura y la sociedad.

Se espera que esta obra contribuya al fortalecimiento del conocimiento técnico y científico sobre el arbolado urbano y que, al mismo tiempo, promueva una visión más integrada, responsable y sostenible para su manejo y conservación en beneficio de las generaciones presentes y futuras.

10.69821/978-628-97750-2-0

ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO 4
AGRADECIMIENTOS 7
PRESENTACIÓN 8
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS 14
INTRODUCCIÓN GENERAL 16
CAPÍTULO I 20
EL ÁRBOL URBANO COMO INFRAESTRUCTURA VIVA: FUNDAMENTOS PARA SU MANEJO Y CONSERVACIÓN 20
1.1 El arbolado urbano como infraestructura viva en la Ciudad de Panamá . 21
1.2 Infraestructura verde y arbolado urbano en el marco de la planificación contemporánea 23
1.3 Fundamento biológico del árbol urbano: fisiología, estrés y capacidad de respuesta 25
1.4 Fundamento biomecánico del árbol urbano: estabilidad, cargas y comportamiento estructural 30
1.5 El sistema raíz–fuste–copa como unidad estructural y funcional integrada 37
1.6 Interpretación del daño, deterioro interno y compartimentación (CODIT) 40
1.7 Cargas dinámicas, estacionalidad tropical y exposición urbana 46
CAPÍTULO II 56
BASES MORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DEL ÁRBOL URBANO PARA SU EVALUACIÓN TÉCNICA 56
2.1 Organización morfológica general del árbol urbano 57
2.2 Sistema radical y anclaje en suelos urbanos 58
2.3 Fuste, crecimiento secundario y resistencia mecánica 60
2.4 Arquitectura de copa y distribución de cargas 62
2.5 Principios biológicos del daño y compartimentación (CODIT) 64
2.6 Indicadores estructurales observables en la evaluación técnica urbana .. 67
CAPÍTULO III 69
METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN TÉCNICA DEL ARBOLADO URBANO 69
3.1 Enfoque metodológico de evaluación del arbolado urbano 70

3.2 Componentes de la evaluación estructural 72
3.3 Clasificación preliminar de condición estructural 79
3.4 Exposición, dianas y análisis de consecuencia 81
3.5 Registro técnico y trazabilidad institucional 84
3.6 Toma de decisiones y acciones de manejo 89
CAPÍTULO IV 91
GESTIÓN E INTERVENCIÓN DEL ARBOLADO URBANO BASADAS EN EVALUACIÓN DE RIESGO Y PRINCIPIOS BIOMECÁNICOS 91
4.1 Marco institucional y regulatorio de la gestión del arbolado urbano en Panamá 92
4.2 Principios generales de intervención 93
4.3 Poda: fundamentos técnicos y criterios de aplicación 95
4.4 Intervenciones estructurales complementarias 108
4.5 Tala y sustitución como medida de último recurso 110
CAPÍTULO V 113
EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL RIESGO EN EL ARBOLADO URBANO .. 113
5.1 Concepto de riesgo en arboricultura 113
5.2 Observación estructurada en campo 120
5.3 Diagnóstico estructural como determinante de probabilidad de falla 125
5.4 Diagnóstico sanitario y su influencia en la probabilidad de falla 128
5.5 Conflictos árbol–infraestructura y daños antropogénicos como modificadores del riesgo 132
5.6 Integración diagnóstica y clasificación del nivel de riesgo 136
5.7 Procedimiento aplicado en la Ciudad de Panamá 137
5.8 Matriz semicuantitativa de evaluación del riesgo arbóreo 141
CAPÍTULO VI 150
PLANIFICACIÓN, GOBERNANZA Y NORMATIVA MUNICIPAL 150
6.1 Gobernanza del arbolado urbano en ciudades tropicales 150
6.2 Marco normativo del arbolado urbano en Panamá 151
6.3 Competencias municipales en la gestión del arbolado urbano 155
6.4 Instrumentos de planificación del arbolado urbano 156
6.5 Coordinación interinstitucional 157
6.6 Participación ciudadana en la gestión del arbolado urbano 157

6.7 Síntesis institucional de la gestión del arbolado urbano 158
CAPÍTULO VIII 163
SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y BENEFICIOS DEL ARBOLADO URBANO 163
8.1 Marco conceptual de servicios ecosistémicos urbanos 163
8.2 Servicios de regulación climática 168
8.3 Regulación hídrica y gestión de escorrentía 170
8.4 Captura de carbono y mejora de la calidad del aire 173
8.5 Biodiversidad urbana y conectividad ecológica 175
8.6 Beneficios sociales, salud pública y bienestar urbano 177
CAPÍTULO IX 181
Especies Prioritarias para la Infraestructura Verde Urbana de Panamá 181
9.1 Marco conceptual de selección 182
9.2 Estructura del Perfil Funcional Urbano 183
9.3 Especies estructurantes de gran sombra 187
9.5 Especies ornamentales de porte controlado 207
9.6 Especies para corredores ribereños urbanos 215
9.7 Estrategias y lineamientos para su implementación 223
CAPÍTULO X 226
Gestión, monitoreo y mantenimiento a largo plazo del arbolado urbano 226
10.1 Enfoque de gestión adaptativa en el arbolado urbano 227
10.2 Inventario arbóreo y sistemas de información 228
10.3 Monitoreo estructural y evaluación periódica 228
10.4 Mantenimiento silvicultural preventivo 229
10.5 Protocolos de intervención ante riesgo 230
10.6 Indicadores de desempeño ecosistémico 230
10.7 Modelo operativo municipal y coordinación institucional 230
CONSIDERACIONES FINALES Y PERSPECTIVAS 232
REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS 235
ANEXOS 238
ANEXO A 238
Formato técnico de inventario y evaluación del arbolado urbano 238
ANEXO B 244

10.69821/978-628-97750-2-0

Protocolo avanzado de evaluación proporcional del riesgo arbóreo 244
ANEXO C 248
Protocolo técnico para la ejecución de poda en arbolado urbano 248
GLOSARIO 253

10.69821/978-628-97750-2-0

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

CODIT — *Compartmentalization of Decay in Trees* (Compartimentación del deterioro en árboles)

ISA — International Society of Arboriculture

TRAQ — Tree Risk Assessment Qualification

FAO — Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change

MiAmbiente — Ministerio de Ambiente de Panamá

ETESA — Empresa de Transmisión Eléctrica S.A.

SIG — Sistema de Información Geográfica

IR — Índice de Riesgo

PF — Probabilidad de Falla

PI — Probabilidad de Impacto

SC — Severidad de Consecuencia

t/R — Relación entre espesor de pared residual y radio del fuste

BMP — Best Management Practices

EPP — Equipo de Protección Personal

CO_2 — Dióxido de carbono

GIS — Geographic Information System

10.69821/978-628-97750-2-0

10.69821/978-628-97750-2-0

INTRODUCCIÓN GENERAL

El proceso de urbanización representa una de las transformaciones territoriales más importantes del siglo XXI, modificando progresivamente la estructura ecológica de los paisajes y generando nuevas presiones sobre los sistemas naturales. El crecimiento de las ciudades, la expansión de la infraestructura construida y la intensificación de las actividades humanas han alterado procesos fundamentales relacionados con la dinámica hídrica, el balance energético, la calidad ambiental y la biodiversidad urbana. Dentro de este escenario, el árbol urbano emerge como un componente esencial capaz de contribuir a la mitigación de múltiples impactos asociados al desarrollo urbano contemporáneo.

Tradicionalmente, los árboles establecidos en espacios urbanos fueron considerados principalmente como elementos ornamentales destinados a mejorar la estética del paisaje. Sin embargo, durante las últimas décadas, la evidencia científica ha demostrado que el arbolado urbano desempeña funciones ecosistémicas fundamentales relacionadas con la regulación térmica, la captura y almacenamiento de carbono, la interceptación de agua pluvial, la reducción de contaminantes atmosféricos y acústicos, la conservación de la biodiversidad y el bienestar físico y psicológico de la población.

Actualmente, el árbol urbano es reconocido como un componente central de la infraestructura verde y como una infraestructura viva integrada al funcionamiento de las ciudades. A diferencia de las estructuras convencionales de ingeniería, cuya respuesta puede predecirse mediante propiedades relativamente constantes, los árboles corresponden a organismos vivos sometidos a procesos continuos de crecimiento, adaptación, envejecimiento y respuesta frente a estímulos ambientales. Esta condición introduce un grado importante de complejidad en su evaluación y manejo, debido a que su comportamiento depende simultáneamente de factores fisiológicos, estructurales y ambientales.

10.69821/978-628-97750-2-0

En el entorno urbano, los árboles se desarrollan bajo condiciones significativamente distintas a las presentes en ecosistemas naturales. La compactación del suelo, la reducción del espacio disponible para el desarrollo radicular, la alteración de los flujos hidrológicos, las podas inadecuadas y la proximidad a infraestructura urbana generan condiciones de estrés que afectan su crecimiento y estabilidad estructural. A estas limitaciones se suman los efectos asociados al cambio climático, incluyendo incrementos en la temperatura, variabilidad en los patrones de precipitación y mayor frecuencia de eventos meteorológicos extremos.

En ciudades tropicales como la Ciudad de Panamá, estas condiciones adquieren características particulares debido a la combinación de elevadas temperaturas, alta humedad relativa, intensas precipitaciones y acelerados procesos de expansión urbana. La interacción entre estos factores modifica la dinámica de crecimiento y adaptación del árbol urbano, influye sobre su comportamiento biomecánico y condiciona la aparición de escenarios de riesgo asociados a fallas estructurales.

La gestión contemporánea del árbol urbano requiere superar enfoques tradicionales sustentados exclusivamente en criterios ornamentales o respuestas reactivas frente a problemas visibles. La complejidad inherente a estos organismos demanda la incorporación de principios provenientes de la fisiología vegetal, la biomecánica, la arboricultura moderna, la evaluación del riesgo y la planificación territorial, con el propósito de establecer procesos de manejo basados en evidencia científica y criterios técnicamente verificables.

En este contexto, la presente obra desarrolla un marco conceptual y metodológico orientado a comprender al árbol urbano como una infraestructura viva cuya estabilidad y funcionamiento dependen de la interacción entre procesos biológicos, condiciones estructurales y características del entorno urbano.

El contenido del libro se organiza de manera progresiva, iniciando con los fundamentos biológicos y biomecánicos que explican el comportamiento

estructural y funcional del árbol urbano. Posteriormente, se abordan aspectos relacionados con los procesos de deterioro interno, evaluación estructural y análisis del riesgo arbóreo, incorporando principios y metodologías que sustentan la toma de decisiones técnicas. Finalmente, se desarrollan criterios asociados a la gestión, intervención y gobernanza del arbolado urbano, considerando las condiciones particulares de la Ciudad de Panamá y el marco normativo que regula su manejo.

Más allá de presentar una síntesis de conocimientos técnicos y científicos, esta obra busca promover una visión integral sobre el papel que desempeñan los árboles dentro del sistema urbano contemporáneo. Comprender al árbol urbano como infraestructura viva implica reconocer que su permanencia y funcionalidad dependen no solo de su biología, sino también de la manera en que las ciudades planifican, gestionan e integran sus sistemas naturales dentro del entorno construido.

El fortalecimiento del conocimiento científico y técnico sobre el árbol urbano constituye un elemento esencial para avanzar hacia ciudades más resilientes, sostenibles y ambientalmente equilibradas, donde la integración entre naturaleza y desarrollo urbano responda a principios de planificación responsable y gestión basada en evidencia.

Esta obra aspira a convertirse en un recurso de consulta y apoyo para estudiantes, investigadores, profesionales, gestores municipales y tomadores de decisiones interesados en fortalecer una gestión urbana sustentada en criterios científicos, promoviendo una relación más equilibrada entre ciudad, infraestructura y naturaleza.

10.69821/978-628-97750-2-0

10.69821/978-628-97750-2-0

CAPÍTULO I

EL ÁRBOL URBANO COMO INFRAESTRUCTURA VIVA:

FUNDAMENTOS PARA SU MANEJO Y CONSERVACIÓN

El arbolado urbano se configura como una infraestructura viva, dinámica y funcional integrada al sistema urbano, cuyo comportamiento está determinado por procesos biológicos y mecánicos que condicionan su crecimiento, estabilidad y desempeño ecológico. A diferencia de las infraestructuras convencionales, los árboles presentan respuestas adaptativas frente a condiciones ambientales variables, lo que exige enfoques de gestión que articulen su naturaleza biológica con las restricciones propias del entorno construido.

En el entorno urbano, el desarrollo de los árboles ocurre bajo condiciones significativamente distintas a las de los ecosistemas naturales. La compactación del suelo, la limitación del volumen radicular, la alteración de los flujos hidrológicos y la exposición a contaminantes generan estados de estrés que afectan la fisiología vegetal y modifican patrones de crecimiento. Estas condiciones inciden en la formación de la madera, la arquitectura de la copa y la capacidad de resistencia estructural.

Desde la perspectiva biomecánica, el árbol opera como una estructura flexible sometida a cargas estáticas y dinámicas. El viento constituye el principal agente de carga, generando esfuerzos de flexión, compresión, tracción y torsión que deben ser disipados por el sistema estructural. La respuesta frente a estas solicitaciones depende de variables como la relación altura-diámetro, la geometría de la copa, la distribución de la biomasa y la integridad del tejido leñoso.

La estabilidad estructural se encuentra estrechamente vinculada a la interacción entre el sistema radicular y las propiedades del suelo. En condiciones de saturación hídrica —frecuentes en Panamá durante la temporada lluviosa— la

resistencia al anclaje disminuye, incrementando la probabilidad de volcamiento, especialmente en individuos con sistemas radiculares restringidos o alterados por intervenciones inadecuadas.

Adicionalmente, los procesos de deterioro interno, como la descomposición de la madera, pueden comprometer la integridad estructural sin manifestaciones externas evidentes. La identificación e interpretación de defectos estructurales y signos de degradación constituyen, por tanto, un componente esencial en la evaluación técnica del arbolado urbano.

El manejo del arbolado urbano debe regirse por el principio de intervención proporcional, en el cual las decisiones se sustentan en la condición estructural del individuo, el nivel de riesgo y las características del entorno. Este enfoque evita intervenciones generalizadas o excesivas y promueve prácticas de manejo compatibles con la biología del árbol y su función dentro del sistema urbano.

Bajo este enfoque, el arbolado urbano se consolida como una infraestructura esencial para la sostenibilidad de la ciudad. Su adecuada gestión permite maximizar los beneficios ecosistémicos, reducir riesgos estructurales y fortalecer la resiliencia urbana en contextos altamente intervenidos.

1.1 El arbolado urbano como infraestructura viva en la Ciudad de Panamá

El arbolado urbano constituye un componente estructural del sistema ecológico urbano y se integra como una infraestructura viva estratégica dentro de la planificación territorial y la gestión municipal. A diferencia de las estructuras convencionales de carácter inerte, cuyo comportamiento es relativamente predecible, el árbol corresponde a un organismo leñoso perenne cuyo desempeño funcional depende de procesos fisiológicos activos, crecimiento secundario continuo y capacidad adaptativa frente a condiciones ambientales variables (Taiz et al., 2022; Nowak et al., 2014; Konijnendijk, 2021).

En el entorno urbano, esta condición biológica introduce una complejidad adicional, ya que el individuo arbóreo no solo ocupa un espacio físico, sino que

establece interacciones dinámicas con el suelo, la atmósfera, la infraestructura construida y las actividades humanas. Como se observa en la Figura 1.1, el árbol establecido en un alcorque se desarrolla en estrecha proximidad a pavimentos, redes de servicios y edificaciones, lo que condiciona tanto la arquitectura radicular como la distribución de cargas estructurales.

Figura 1.1

Árbol urbano establecido en alcorque con interacción directa con infraestructura vial en la Ciudad de Panamá.



Nota. La restricción volumétrica radicular y la proximidad a infraestructura construida condicionan el desarrollo estructural y la estabilidad del individuo.

La estabilidad y permanencia del arbolado no pueden evaluarse bajo criterios exclusivamente paisajísticos, sino mediante un enfoque integrado que articule su comportamiento biológico y estructural (Niklas, 1992; Peltola, 2006). La restricción del volumen de suelo y la proximidad a infraestructura construida

forman parte del sistema que determina su desempeño estructural en el entorno urbano.

La literatura internacional reconoce al arbolado urbano como un componente esencial de la infraestructura verde, entendida como una red de elementos naturales y seminaturales que proveen servicios ecosistémicos fundamentales para la resiliencia urbana (FAO, 2016; Konijnendijk et al., 2021). En este marco, los árboles urbanos contribuyen a la regulación térmica, la mejora de la calidad del aire, la interceptación de escorrentía pluvial y la mitigación de impactos asociados al cambio climático (Nowak et al., 2014; Livesley et al., 2016).

En Panamá, las condiciones climáticas caracterizadas por altas temperaturas, elevada humedad relativa y precipitaciones intensas refuerzan el papel del arbolado urbano como regulador microclimático y componente clave en la dinámica hídrica urbana. Estas mismas condiciones incrementan la exposición a cargas dinámicas asociadas a tormentas convectivas y procesos de saturación del suelo, factores que influyen directamente en la estabilidad estructural y demandan una gestión basada en evaluación técnica y planificación preventiva (Peltola, 2006; James et al., 2018; IPCC, 2022).

La estabilidad del arbolado debe interpretarse como el resultado de la interacción entre raíces, fuste y copa, cuya condición evoluciona en el tiempo y se encuentra condicionada por el entorno construido. La pérdida de individuos no solo representa un riesgo físico, sino también una disminución en la provisión de servicios ecosistémicos, lo que refuerza la necesidad de incorporar criterios técnicos estandarizados en su evaluación, documentación y seguimiento (Dunster et al., 2017).

1.2 Infraestructura verde y arbolado urbano en el marco de la planificación contemporánea

El reconocimiento del arbolado urbano como infraestructura viva se inscribe en el concepto de infraestructura verde, entendido como un sistema estratégico de elementos naturales y seminaturales que sostienen funciones ecológicas

esenciales dentro del entorno urbano. En este enfoque, la infraestructura verde no constituye un complemento paisajístico, sino un componente estructural que contribuye a la resiliencia territorial, la regulación climática y la calidad ambiental.

La literatura en silvicultura urbana identifica al arbolado como un elemento central de esta red funcional, en tanto provee servicios ecosistémicos clave para el funcionamiento de la ciudad (FAO, 2016). La planificación contemporánea ha incorporado criterios cuantitativos para su integración en contextos urbanos densos. Entre ellos, la regla 3–30–300 propuesta por Konijnendijk (2021) establece umbrales operativos para mejorar la habitabilidad urbana: visibilidad de al menos tres árboles desde la residencia, una cobertura arbórea del 30 % a escala de barrio y acceso a espacios verdes a una distancia máxima de 300 metros.

Estos lineamientos no sustituyen la evaluación estructural ni el análisis de riesgo, pero consolidan el carácter estratégico del arbolado dentro de la planificación territorial. Su aplicación contribuye a mejorar la calidad ambiental, favorecer la salud pública y fortalecer la capacidad adaptativa frente al cambio climático.

Desde la perspectiva de los servicios ecosistémicos, el arbolado urbano interviene en procesos clave como la reducción de contaminantes atmosféricos y la mejora de la salud humana (Nowak et al., 2014), así como en la regulación del ciclo hidrológico urbano, la mitigación de la isla de calor y la captura de carbono (Livesley et al., 2016). La magnitud de estos beneficios depende de variables estructurales y de manejo, incluyendo la densidad del dosel, la arquitectura de la copa, la selección de especies y las condiciones del sitio.

En Panamá, las condiciones climáticas caracterizadas por altas temperaturas, elevada humedad relativa y precipitaciones intensas refuerzan la función del arbolado como regulador microclimático y componente activo en la gestión hídrica urbana. Los escenarios de intensificación de eventos extremos documentados por el IPCC (2022) subrayan la necesidad de integrar criterios de adaptación climática

en la planificación urbana, incluyendo el fortalecimiento de la cobertura arbórea y la gestión basada en la exposición.

La integración del arbolado en la infraestructura verde no elimina su condición biológica ni su potencial de falla estructural. La gestión contemporánea exige equilibrar la provisión de servicios ecosistémicos con la reducción proporcional del riesgo. Este equilibrio requiere la aplicación de metodologías estandarizadas de evaluación, como las desarrolladas por la *International Society of Arboriculture* (Dunster et al., 2017), que permiten articular la seguridad pública y la conservación ambiental dentro de un mismo marco de gestión.

En este sentido, el arbolado urbano en la Ciudad de Panamá debe incorporarse de manera explícita en los instrumentos de planificación territorial como una infraestructura estratégica, cuyo manejo técnico incide directamente en la resiliencia urbana y la sostenibilidad del sistema urbano.

1.3 Fundamento biológico del árbol urbano: fisiología, estrés y capacidad de respuesta

El árbol urbano es un organismo dinámico cuya estabilidad y permanencia dependen de procesos fisiológicos activos que regulan el crecimiento, la producción de biomasa y la respuesta frente a condiciones ambientales cambiantes. La fotosíntesis, el transporte de agua a través del xilema, la redistribución de fotoasimilados mediante el floema y la formación de tejido leñoso secundario constituyen procesos esenciales que determinan su desempeño estructural y funcional (Taiz et al., 2022).

En el entorno urbano, estos procesos operan bajo condiciones frecuentemente restrictivas, como la compactación del suelo, la limitación del volumen radicular, la alteración del drenaje, el estrés térmico y las perturbaciones mecánicas. Estas restricciones afectan el vigor fisiológico y modifican la arquitectura del individuo, generando respuestas adaptativas que pueden alterar la orientación del fuste y la distribución de la copa.

Como se observa en la Figura 1.2, un individuo con copa densa y apariencia vigorosa —indicativa de actividad fotosintética activa— puede presentar simultáneamente una ligera inclinación del eje estructural. Esta condición suele estar asociada a la pendiente del terreno y a procesos de ajuste mecánico frente a cargas gravitacionales y dinámicas. La imagen evidencia un principio central en la evaluación del arbolado urbano: la condición foliar no constituye un indicador suficiente de estabilidad estructural.

Figura 1.2

Individuo arbóreo con copa vigorosa y ligera inclinación estructural en entorno urbano con pendiente en la Ciudad de Panamá.



*Nota***.** La inclinación del eje del fuste puede representar adaptación mecánica asociada a condiciones del sitio. La apariencia foliar saludable no excluye tensiones estructurales subyacentes.

La inclinación progresiva puede interpretarse como una respuesta adaptativa en la que el árbol redistribuye el crecimiento secundario para compensar tensiones asimétricas, mediante la formación de madera de reacción (Niklas, 1992). Este mecanismo busca restablecer el equilibrio mecánico; sin embargo, su eficacia depende de las condiciones del sitio, particularmente de la cohesión del suelo y de la capacidad de anclaje del sistema radical.

En entornos urbanos con presencia de dianas —como infraestructura, vehículos o zonas de tránsito— la evaluación debe integrar la relación entre inclinación estructural, condición del suelo y nivel de exposición. La presencia de copas desarrolladas incrementa la superficie de captura de viento, lo que puede amplificar los momentos de flexión durante eventos convectivos intensos.

La gestión técnica del arbolado urbano requiere diferenciar entre condición fisiológica aparente y estabilidad estructural efectiva. El análisis integrado del sistema raíz–fuste–copa, junto con las características del sitio, permite evitar interpretaciones simplificadas y sustentar decisiones de manejo basadas en criterios técnicos.

1.3.1 Transporte hidráulico y equilibrio hídrico

El sistema vascular del árbol está constituido por xilema y floema, tejidos especializados en el transporte de agua, nutrientes minerales y fotoasimilados. El flujo ascendente de agua a través del xilema mantiene la turgencia celular y sostiene la actividad fotosintética de la copa, constituyendo un proceso fundamental para el funcionamiento fisiológico y estructural del individuo (Taiz et al., 2022).

La continuidad hidráulica del xilema es esencial para garantizar este flujo. Su alteración —ya sea por cavitación, daño radicular o limitaciones físicas del suelo— puede comprometer la conducción de agua y generar disfunciones que preceden a la manifestación de síntomas visibles. Estas fallas hidráulicas afectan directamente el balance hídrico del árbol y reducen su capacidad de respuesta frente a condiciones de estrés.

En entornos urbanos, la compactación del suelo representa uno de los principales factores que afectan el equilibrio hídrico. La reducción de la porosidad limita la infiltración de agua y la disponibilidad de oxígeno en la zona radicular, restringiendo la absorción hídrica y el desarrollo de raíces funcionales. Esta condición induce estados de estrés fisiológico crónico que disminuyen el vigor del individuo y afectan su estabilidad a largo plazo (Day et al., 2010).

La interacción entre disponibilidad hídrica, aireación del suelo y funcionamiento radicular condiciona la capacidad del árbol para sostener procesos metabólicos esenciales y responder a perturbaciones ambientales. En consecuencia, el análisis del equilibrio hídrico constituye un componente crítico en la evaluación técnica del arbolado urbano, particularmente en contextos donde las condiciones edáficas han sido alteradas por la urbanización.

1.3.2 Crecimiento secundario y refuerzo estructural

El crecimiento radial del fuste, resultado de la actividad del cambium vascular, incrementa progresivamente la sección resistente del árbol y constituye un mecanismo fundamental de refuerzo estructural frente a cargas mecánicas. Este proceso permite mejorar la capacidad del individuo para resistir esfuerzos de flexión y compresión, ajustando su geometría en función de las condiciones de carga a las que está sometido.

La formación de madera de reacción representa una respuesta adaptativa ante tensiones asimétricas, como inclinaciones del fuste o cargas desbalanceadas en la copa. Este tipo de crecimiento diferencial modifica las propiedades mecánicas del tejido leñoso y contribuye a restablecer el equilibrio estructural del árbol, evidenciando la estrecha relación entre procesos fisiológicos y comportamiento biomecánico (Niklas, 1992).

En condiciones urbanas, el crecimiento secundario puede verse limitado por factores como el estrés hídrico, la deficiencia nutricional, la compactación del suelo y el daño radicular. Estas restricciones reducen la actividad cambial y, en consecuencia, la capacidad del árbol para incrementar su sección resistente.

La disminución del crecimiento radial compromete progresivamente la capacidad estructural del fuste, especialmente cuando el árbol continúa expuesto a cargas dinámicas sin un refuerzo proporcional de su estructura. En este sentido, la evaluación del crecimiento secundario constituye un indicador relevante para interpretar la estabilidad potencial del arbolado urbano y anticipar escenarios de falla a mediano plazo.

1.3.3 Estrés urbano y vulnerabilidad fisiológica

El arbolado urbano se encuentra expuesto de manera simultánea a múltiples factores de estrés, entre los que destacan la restricción del volumen de suelo, la compactación y el sellado superficial, la contaminación atmosférica, las podas reiteradas y la interferencia con infraestructura urbana. La interacción acumulativa de estos factores reduce progresivamente el vigor fisiológico y compromete la capacidad defensiva frente a agentes patógenos. La literatura en silvicultura urbana señala que el estrés crónico incrementa la susceptibilidad al deterioro interno y disminuye la eficiencia de los mecanismos de compartimentación del daño (Shigo, 1984; FAO, 2016).

El cambio climático intensifica estas condiciones al introducir escenarios caracterizados por el aumento de la temperatura y una mayor variabilidad en la disponibilidad hídrica. Estos factores pueden modificar la adecuación ecológica de determinadas especies en entornos urbanos tropicales, incrementando su vulnerabilidad fisiológica (IPCC, 2022). En Panamá, esta combinación de estrés térmico e hídrico condiciona el desempeño del arbolado y refuerza la necesidad de integrar criterios de adaptación climática en la planificación urbana.

La evaluación estructural del arbolado urbano debe incorporar la condición fisiológica del individuo y las características del suelo, dado que ambos factores influyen directamente en su estabilidad. La apariencia foliar, aunque útil como indicador de actividad fotosintética, no constituye por sí sola un criterio suficiente para inferir la integridad estructural.

El monitoreo sistemático permite identificar procesos de debilitamiento progresivo que preceden a fallas estructurales, facilitando intervenciones oportunas y proporcionales. Asimismo, la selección de especies debe considerar su tolerancia a condiciones urbanas restrictivas y a la variabilidad climática, priorizando individuos con mayor capacidad de adaptación a escenarios de estrés.

La comprensión de la fisiología del arbolado urbano adquiere, en este sentido, un carácter operativo, al constituir la base para interpretar señales externas, anticipar condiciones de riesgo y sustentar decisiones de manejo orientadas a la conservación del arbolado y la seguridad pública.

1.4 Fundamento biomecánico del árbol urbano: estabilidad, cargas y comportamiento estructural

La estabilidad del árbol urbano resulta de la interacción entre las propiedades mecánicas del tejido leñoso, la geometría estructural, el régimen de cargas y las condiciones del sitio. A diferencia de las estructuras de ingeniería convencional, el árbol es un organismo en crecimiento continuo cuyo material estructural es biológicamente heterogéneo y responde de manera dinámica a las fuerzas externas (Niklas, 1992).

El tejido leñoso presenta un comportamiento anisotrópico, en el cual las propiedades mecánicas varían según la orientación de las fibras, el contenido de humedad y la presencia de defectos estructurales. Esta condición determina la capacidad del árbol para resistir esfuerzos de compresión, tracción, flexión y torsión, que actúan simultáneamente bajo condiciones reales de carga.

Desde el punto de vista estructural, la forma del árbol —particularmente la relación altura-diámetro, la arquitectura de la copa y la distribución de la biomasa— influye directamente en la magnitud de los esfuerzos generados. La copa actúa como superficie de captación de viento, incrementando el momento de flexión transmitido al fuste y al sistema radicular durante eventos de carga dinámica (Peltola, 2006).

El comportamiento estructural del árbol no puede interpretarse de manera aislada del suelo en el que se desarrolla. La interacción raíz–suelo constituye el sistema de anclaje que permite disipar las cargas transmitidas desde la parte aérea. Factores como la cohesión del suelo, su grado de saturación y la extensión del sistema radical condicionan la resistencia al volcamiento, especialmente en entornos urbanos donde el volumen radicular suele estar restringido.

Las cargas que actúan sobre el árbol pueden clasificarse en estáticas y dinámicas. Las primeras corresponden al peso propio de la estructura, mientras que las segundas —principalmente asociadas al viento— generan esfuerzos variables en magnitud y dirección. La naturaleza oscilatoria de estas cargas implica que el árbol experimenta ciclos repetitivos de tensión y compresión, lo que influye en su comportamiento a largo plazo.

La capacidad del árbol para adaptarse a estas solicitaciones depende de su crecimiento secundario y de la redistribución de biomasa en respuesta a estímulos mecánicos. Este proceso, conocido como adaptación mecánica, permite modificar la geometría estructural y reforzar zonas sometidas a mayores tensiones, contribuyendo a la estabilidad global del individuo.

La evaluación biomecánica del arbolado urbano requiere, por tanto, un enfoque integrado que considere simultáneamente las propiedades del material, la forma del árbol, las condiciones del suelo y el régimen de cargas. Esta aproximación permite interpretar el comportamiento estructural de manera realista y sustentar decisiones de manejo orientadas a la reducción del riesgo y la conservación del arbolado.

1.4.1 Propiedades mecánicas de la madera

La madera constituye un material estructural de naturaleza anisotrópica, cuya resistencia y rigidez varían en función de la dirección de la carga respecto a la orientación de las fibras. Este comportamiento implica que su respuesta mecánica no es uniforme, presentando mayor resistencia en dirección longitudinal que en direcciones radial y tangencial (Niklas, 1992).

10.69821/978-628-97750-2-0

Las propiedades mecánicas de la madera están condicionadas por factores como la densidad, el contenido de humedad, la edad del tejido y su estado de integridad interna. La variabilidad de estos parámetros influye directamente en la capacidad del árbol para soportar esfuerzos de flexión, compresión y torsión bajo condiciones de carga.

Los procesos de deterioro biológico, particularmente aquellos asociados a hongos xilófagos, pueden reducir significativamente la sección resistente del fuste sin generar manifestaciones externas evidentes. Esta pérdida de integridad estructural altera la distribución de esfuerzos y disminuye la capacidad de carga del árbol, incrementando su vulnerabilidad ante solicitaciones mecánicas.

En este contexto, la madera no puede interpretarse como un material homogéneo ni isotrópico, lo que diferencia al árbol de las estructuras convencionales de ingeniería. La evaluación estructural del arbolado urbano requiere considerar la heterogeneidad anatómica entre especies, así como la variabilidad interna dentro de un mismo individuo.

La interpretación del riesgo estructural debe integrar estas características del material leñoso, evitando aproximaciones simplificadas que asimilen el comportamiento del árbol al de elementos estructurales inertes. Este enfoque permite una evaluación más precisa de la estabilidad y una toma de decisiones ajustada a la condición real del individuo.

1.4.2 Geometría estructural y distribución de esfuerzos

a geometría del árbol condiciona la distribución de esfuerzos y su respuesta frente a cargas externas. Variables como la altura total, el diámetro del fuste, la relación altura–diámetro y la arquitectura de la copa determinan la magnitud y la transferencia de cargas hacia el sistema radical. Estas características estructurales influyen directamente en la estabilidad del individuo y en su comportamiento bajo solicitaciones dinámicas.

La relación altura–diámetro constituye un indicador relevante de esbeltez estructural, asociado a la capacidad del fuste para resistir esfuerzos de flexión. A medida que esta relación aumenta, también lo hace la susceptibilidad a deformaciones y fallas bajo cargas de viento, especialmente en individuos con copas desarrolladas o asimétricas.

Como se observa en la Figura 1.3, un árbol establecido en un entorno urbano altamente intervenido puede presentar modificaciones geométricas inducidas por las condiciones del sitio. La inclinación del eje estructural y la asimetría de la copa reflejan ajustes adaptativos frente a restricciones espaciales, disponibilidad de luz y presiones mecánicas externas. Estas configuraciones alteran la distribución de cargas y deben ser consideradas en la evaluación estructural.

El momento de flexión inducido por el viento se incrementa con la altura del árbol y su grado de exposición lateral (Peltola, 2006). En espacios abiertos, como estacionamientos y avenidas amplias, los individuos se encuentran más expuestos a cargas dinámicas, lo que puede generar mayores tensiones en comparación con árboles parcialmente protegidos por edificaciones u otras estructuras.

10.69821/978-628-97750-2-0

Figura 1.3

Árbol urbano en estacionamiento comercial con restricción volumétrica radicular y exposición a tránsito vehicular en la Ciudad de Panamá.



Nota. La configuración geométrica del individuo, la limitación del espacio radicular y la proximidad a dianas móviles condicionan la evaluación de estabilidad y riesgo estructural.

La interacción entre geometría estructural, condiciones del sitio y nivel de exposición define el comportamiento mecánico del árbol en el entorno urbano. En

consecuencia, la evaluación estructural requiere un análisis integrado que considere tanto la forma del individuo como las características del espacio en el que se desarrolla, permitiendo una estimación más precisa de su estabilidad y del riesgo asociado.

1.4.3 Cargas estáticas y dinámicas

Las cargas que actúan sobre el árbol se agrupan en dos categorías principales: cargas estáticas y cargas dinámicas. Las cargas estáticas corresponden al peso propio del individuo y a la masa adicional asociada a la intercepción de agua durante eventos de precipitación, mientras que las cargas dinámicas derivan de la acción del viento, generando esfuerzos de flexión, torsión y redistribución interna de tensiones.

Ante solicitaciones de viento, el árbol se comporta como un sistema estructural flexible capaz de disipar energía mediante oscilación y amortiguación natural (Peltola, 2006). Esta capacidad constituye un mecanismo adaptativo que reduce la concentración de esfuerzos en el fuste y en el sistema radical; sin embargo, su efectividad está condicionada por la integridad estructural del individuo y por la calidad del anclaje raíz–suelo.

La magnitud de las cargas dinámicas depende de variables como la velocidad del viento, la arquitectura de la copa y el grado de exposición del árbol. Copas densas o asimétricas incrementan la superficie de interacción con el viento, aumentando los momentos de flexión y la demanda estructural sobre el fuste.

La interacción entre viento y condiciones del suelo representa un factor crítico en la estabilidad del arbolado urbano. Durante eventos de precipitación intensa, la saturación hídrica reduce la resistencia al corte del suelo y disminuye la capacidad de anclaje del sistema radical. Bajo estas condiciones, incluso individuos con fustes aparentemente íntegros pueden presentar fallas por volcamiento.

La evaluación estructural del arbolado urbano debe integrar de manera conjunta las cargas mecánicas, las condiciones edáficas y el nivel de exposición del individuo. Este enfoque permite interpretar de forma más precisa la estabilidad del árbol y sustentar decisiones de manejo basadas en la relación entre solicitación mecánica y capacidad de resistencia.

1.4.4 Interacción árbol–suelo

La interacción árbol–suelo constituye un componente determinante en la estabilidad estructural del arbolado urbano, al representar el sistema a través del cual se transfieren las cargas generadas en la copa y el fuste hacia el terreno. La capacidad de anclaje depende tanto de la arquitectura del sistema radical como de las propiedades físicas y mecánicas del suelo, particularmente su densidad aparente, cohesión y resistencia al corte (Day et al., 2010).

Las alteraciones del entorno urbano afectan directamente esta interacción. La compactación del suelo, la reducción del volumen radicular efectivo y el corte de raíces asociado a obras civiles limitan el desarrollo estructural del sistema radical, disminuyendo la capacidad de disipación de cargas y aumentando la susceptibilidad al volcamiento. Estas condiciones generan sistemas radiculares menos extensos y funcionalmente restringidos, incapaces de responder adecuadamente a solicitaciones mecánicas intensas.

En Panamá, la dinámica climática introduce un factor adicional de inestabilidad. Los eventos de precipitación intensa producen periodos de saturación hídrica que reducen la resistencia al corte del suelo, modificando temporalmente la interacción raíz–suelo. Bajo estas condiciones, la capacidad de anclaje disminuye de forma significativa, lo que puede desencadenar fallas estructurales incluso en individuos sin defectos visibles en el fuste.

La evaluación de la estabilidad no puede basarse exclusivamente en atributos visibles como el diámetro del fuste. Requiere un análisis integrado que considere la geometría del árbol, la arquitectura de la copa, la distribución de cargas y la condición del sistema radical, así como las características del suelo en el que se

desarrolla. Las intervenciones silviculturales también influyen en esta relación; en particular, las podas severas alteran la distribución de esfuerzos y pueden modificar el comportamiento estructural del individuo.

Desde la gestión urbana, este enfoque implica que la evaluación del arbolado debe ajustarse al nivel de exposición y a la magnitud de las consecuencias potenciales. La comprensión de la interacción árbol–suelo permite sustentar decisiones técnicas más precisas, optimizar la priorización de intervenciones y fortalecer la consistencia en los procesos de manejo del arbolado urbano.

1.5 El sistema raíz–fuste–copa como unidad estructural y funcional integrada

La interpretación del árbol urbano como infraestructura viva requiere un enfoque sistémico que reconozca la interdependencia funcional entre sus componentes. El sistema raíz–fuste–copa constituye una unidad continua en la que los procesos fisiológicos y las solicitaciones mecánicas se integran y se transmiten de manera coordinada.

Desde el punto de vista biomecánico, las cargas generadas por el peso propio y la acción del viento se distribuyen desde la copa a lo largo del fuste hasta el sistema radical, donde finalmente se transfieren al suelo. La respuesta estructural del árbol depende de la integridad y eficiencia de este sistema continuo; por tanto, cualquier alteración en uno de sus componentes modifica el comportamiento global del individuo (Niklas, 1992; Peltola, 2006). La reducción de la sección resistente del fuste, el deterioro del sistema radical o las modificaciones en la arquitectura de la copa alteran la distribución de esfuerzos y pueden incrementar la probabilidad de falla estructural.

En términos fisiológicos, la continuidad vascular asegura el transporte de agua, nutrientes y fotoasimilados entre raíces, fuste y copa. La afectación de uno de estos componentes repercute directamente en el funcionamiento del sistema completo: la limitación radicular reduce la absorción hídrica, las lesiones en el fuste interfieren en la redistribución de carbohidratos y la pérdida significativa de

copa disminuye la capacidad fotosintética necesaria para sostener el crecimiento y los mecanismos de defensa (Taiz et al., 2022).

La estabilidad del árbol urbano emerge, por tanto, de la interacción simultánea entre continuidad mecánica y continuidad fisiológica. Este principio implica que la evaluación estructural no puede centrarse en un único órgano, sino que debe considerar el estado integrado del sistema. En esta línea, los procesos de deterioro y compartimentación descritos por Shigo (1984) evidencian que el daño localizado puede tener implicaciones estructurales más amplias en función de la condición general del individuo.

En entornos urbanos, donde las intervenciones suelen afectar múltiples componentes de forma simultánea —como la combinación de podas intensas y alteraciones del sistema radical durante obras civiles—, el análisis integrado resulta esencial para interpretar correctamente la estabilidad y definir intervenciones proporcionales al nivel de riesgo. Este enfoque permite fundamentar decisiones técnicas coherentes con la biología del árbol y con los objetivos de seguridad y sostenibilidad del sistema urbano.

1.5.1 Interdependencia estructural

La susceptibilidad a la falla estructural del arbolado urbano está determinada por la interacción simultánea de múltiples variables, entre las que destacan la arquitectura y densidad de la copa, la integridad del fuste, la configuración del sistema radical, las propiedades físicas del suelo y el nivel de exposición a cargas dinámicas. Estos factores operan como un sistema acoplado en el que las modificaciones en cualquiera de sus componentes alteran la distribución de esfuerzos y el comportamiento global del individuo.

La arquitectura de la copa condiciona la magnitud de las cargas aerodinámicas; el fuste actúa como elemento de transmisión de esfuerzos; el sistema radical define la capacidad de anclaje; y el suelo regula la respuesta mecánica del conjunto. La estabilidad estructural emerge de la interacción entre estos elementos y no puede inferirse a partir del análisis aislado de uno de ellos.

Las evaluaciones centradas en un único componente incrementan la probabilidad de diagnósticos incompletos y decisiones técnicas inadecuadas. En contraste, los enfoques contemporáneos de evaluación del riesgo arbóreo proponen un análisis integrado que considera simultáneamente las características del árbol y las condiciones del sitio, incorporando variables de exposición y consecuencias potenciales (Dunster et al., 2017).

Este enfoque sistémico permite interpretar de manera más precisa la estabilidad del arbolado urbano y fundamentar decisiones de manejo coherentes con la dinámica estructural del árbol y con los objetivos de seguridad pública.

1.5.2 Continuidad temporal y evolución estructural

El árbol constituye una estructura viva en permanente evolución, cuya condición estructural se modifica a lo largo del tiempo como resultado de procesos simultáneos de crecimiento y deterioro. El crecimiento secundario puede incrementar la sección resistente y generar refuerzos localizados mediante la formación de madera de reacción, mientras que los procesos de degradación interna reducen progresivamente la capacidad portante del tejido leñoso (Niklas, 1992).

La estabilidad estructural debe interpretarse, por tanto, como una condición dinámica y no como un estado fijo. En consecuencia, la evaluación del arbolado urbano no puede abordarse como un evento puntual, sino como un proceso continuo de monitoreo orientado a identificar cambios en la condición del individuo y en su interacción con el entorno.

En Panamá, la variabilidad climática, caracterizada por periodos de alta precipitación, estrés térmico y presión urbana constante, introduce factores que aceleran tanto los procesos de debilitamiento como las modificaciones en el sistema raíz–fuste–copa. Estas condiciones refuerzan la necesidad de incorporar una perspectiva temporal en la evaluación estructural.

El reconocimiento del sistema árbol–suelo como una unidad integrada implica que la inspección debe incluir, siempre que sea posible, la condición del sistema radical y las propiedades del suelo, en conjunto con la evaluación del fuste y la copa. Este enfoque permite interpretar con mayor precisión la estabilidad del individuo al considerar la interacción entre componentes subterráneos y aéreos.

Las decisiones de manejo deben considerar el efecto de las intervenciones sobre la distribución de cargas. Las podas modifican la arquitectura de la copa y, en consecuencia, la respuesta frente a solicitaciones dinámicas; de igual forma, las obras civiles pueden afectar el sistema radical y reducir la capacidad de anclaje. La coordinación técnica entre gestión del arbolado e infraestructura urbana resulta esencial para evitar alteraciones estructurales críticas.

El monitoreo periódico se consolida como un componente central de la gestión, al permitir la detección temprana de cambios progresivos en la estabilidad y la anticipación de condiciones de riesgo. Este enfoque dinámico fortalece la consistencia técnica en la toma de decisiones y sustenta un manejo del arbolado urbano basado en evidencia, alineado con los principios de seguridad pública y sostenibilidad urbana.

1.6 Interpretación del daño, deterioro interno y compartimentación (CODIT)

En el entorno urbano, los árboles están expuestos de manera recurrente a heridas mecánicas, podas, impactos vehiculares, excavaciones y cortes radiculares asociados a obras civiles. La interpretación adecuada de estos daños requiere comprender que el árbol no “repara” el tejido afectado como lo haría una estructura inerte, sino que responde mediante mecanismos biológicos orientados a aislar y contener la degradación.

El modelo de compartimentación del daño en árboles (CODIT), desarrollado por Shigo (1984), establece que, ante una lesión, el árbol forma barreras anatómicas y químicas destinadas a limitar la propagación de patógenos y la progresión de la degradación interna. Estas barreras no restauran la madera afectada, sino que delimitan el daño dentro del tejido. La eficacia de este proceso depende de la

especie, el vigor fisiológico del individuo, la naturaleza de la lesión y la frecuencia de las intervenciones.

1.6.1 Deterioro interno y sección resistente

La estabilidad estructural del fuste está directamente condicionada por la sección resistente remanente, entendida como el volumen de madera funcional capaz de soportar las cargas mecánicas actuantes. Los procesos de degradación asociados a hongos xilófagos reducen progresivamente esta capacidad portante, frecuentemente sin manifestaciones externas evidentes en fases iniciales (Niklas, 1992).

La presencia de cavidades visibles no implica necesariamente una falla estructural inminente, del mismo modo que la ausencia de defectos externos no garantiza la integridad interna del fuste. Esta disociación entre condición externa y estado estructural real constituye uno de los principales desafíos en la evaluación del arbolado urbano.

La literatura especializada en evaluación del riesgo arbóreo establece que la probabilidad de falla no depende exclusivamente de la presencia del defecto, sino de su magnitud, localización y relación con la geometría del fuste y las cargas actuantes (Dunster et al., 2017). En este sentido, la pérdida de sección resistente debe analizarse en función de su impacto sobre la capacidad estructural del conjunto, considerando variables como la distribución de tensiones y la posición del defecto respecto a las zonas de máxima solicitación.

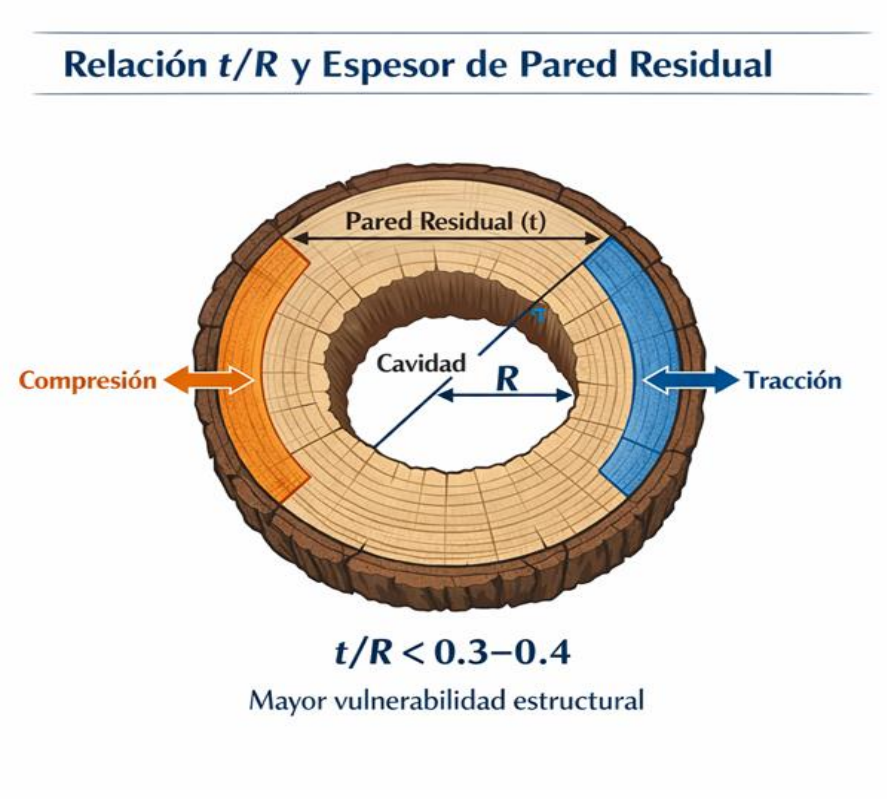
La interpretación del deterioro requiere, por tanto, un enfoque integrado que articule la observación de defectos visibles con la comprensión del comportamiento biomecánico del fuste y las condiciones del entorno. Este enfoque permite reducir la incertidumbre en la evaluación, evitar decisiones basadas en criterios exclusivamente visuales y sustentar intervenciones proporcionales al nivel de riesgo.

1.6.2 Relación t/R y criterios de estabilidad estructural

La evaluación de la estabilidad estructural del fuste en presencia de cavidades o deterioro interno puede complementarse mediante el análisis de la relación entre el espesor de la pared residual (t) y el radio del fuste (R), conocida como relación t/R. Este criterio, derivado de estudios biomecánicos aplicados a estructuras cilíndricas, permite estimar de manera aproximada la capacidad portante del tejido leñoso remanente frente a cargas de flexión.

Figura 1.4

Relación t/R y distribución de tensiones en fuste con cavidad.



Nota. La figura ilustra la relación entre el espesor de la pared residual (t) y el radio del fuste (R), así como la concentración de esfuerzos en zonas de compresión y tracción. Valores bajos de t/R se asocian con mayor vulnerabilidad estructural. Elaboración propia con base en Mattheck & Breloer (1994).

Como se observa en la Figura 1.4, la relación t/R representa la proporción de madera estructural funcional disponible para resistir esfuerzos mecánicos, así

como la distribución de tensiones entre las zonas de compresión y tracción dentro del fuste. En estructuras con cavidades, la reducción del espesor de la pared residual concentra las tensiones en sectores específicos, incrementando la probabilidad de fractura bajo cargas dinámicas.

La relación t/R se interpreta como un indicador de la proporción de sección resistente remanente. Valores bajos de esta relación sugieren una disminución significativa de la capacidad estructural y, por tanto, una mayor susceptibilidad a la falla. En términos generales, la literatura especializada propone valores de referencia orientativos, donde relaciones t/R inferiores a 0.3–0.4 pueden asociarse con condiciones de mayor vulnerabilidad estructural, especialmente cuando coexisten defectos adicionales o elevados niveles de exposición (Mattheck & Breloer, 1994).

No obstante, este criterio no debe aplicarse como umbral absoluto de decisión. La resistencia estructural del árbol depende de múltiples factores, entre ellos la especie, la calidad de la madera, la configuración espacial del deterioro, la altura de la cavidad y la interacción con cargas dinámicas. En este sentido, la relación t/R constituye una herramienta de apoyo dentro de un análisis integral que incorpora la geometría del fuste, la arquitectura de la copa, las condiciones del suelo y el contexto urbano.

Desde una perspectiva biomecánica, la pérdida de sección resistente no solo reduce la capacidad de carga, sino que modifica la distribución interna de tensiones. En fustes parcialmente deteriorados, las tensiones tienden a concentrarse en la pared residual, especialmente en las zonas sometidas a tracción, lo que incrementa la probabilidad de falla cuando el espesor alcanza valores críticos. Este comportamiento refuerza la necesidad de evaluar no solo la magnitud del deterioro, sino también su localización respecto a las zonas de mayor solicitación estructural.

1.6.3 Relación entre vigor y capacidad de defensa

La capacidad de compartimentación del árbol, entendida como el proceso biológico mediante el cual se aíslan y limitan los tejidos dañados, está directamente condicionada por su estado fisiológico. Individuos con adecuado vigor presentan mayor eficiencia en la formación de barreras químicas y anatómicas que restringen la propagación del deterioro interno, mientras que árboles sometidos a estrés crónico muestran una respuesta defensiva reducida (Shigo, 1984; FAO, 2016).

Factores como la compactación del suelo, la restricción radicular, el déficit hídrico, la contaminación y las podas severas afectan la disponibilidad de recursos energéticos y la capacidad metabólica del individuo, limitando la formación de tejidos de defensa. Esta condición incrementa la susceptibilidad a la degradación por agentes bióticos y acelera la pérdida de integridad estructural del fuste.

La relación entre vigor fisiológico y estabilidad estructural implica que el deterioro interno no puede interpretarse exclusivamente como un fenómeno mecánico, sino como el resultado de procesos biológicos condicionados por el entorno. En este sentido, la evaluación del arbolado urbano requiere integrar indicadores de vigor —como densidad foliar, crecimiento radial y condición general de la copa— con el análisis de defectos estructurales.

En el contexto urbano de Panamá, donde coexisten altas temperaturas, elevada humedad relativa y eventos de precipitación intensa, las condiciones ambientales influyen simultáneamente sobre la fisiología del árbol y la estabilidad del sistema raíz–suelo. Esta interacción refuerza la necesidad de interpretar el deterioro dentro de un marco sistémico que articule variables biológicas, estructurales y del sitio.

1.6.4 Proporcionalidad en la toma de decisiones

La proporcionalidad al riesgo constituye un principio fundamental en la gestión del arbolado urbano, al establecer que la probabilidad de falla debe evaluarse en conjunto con la probabilidad de impacto y la magnitud de las consecuencias potenciales. Este enfoque, ampliamente adoptado en metodologías internacionales de evaluación arbórea, permite orientar las decisiones de manejo en función del nivel real de riesgo y no únicamente de la presencia de defectos estructurales (Dunster et al., 2017).

En este marco, un árbol con deterioro interno moderado ubicado en un área de baja exposición puede requerir únicamente monitoreo periódico, mientras que condiciones estructurales similares en entornos de alta ocupación —como centros educativos, hospitales o corredores viales— justifican intervenciones más intensivas. La exposición, entendida como la presencia de dianas potenciales, se convierte así en un componente determinante en la priorización de acciones.

La interpretación del deterioro interno debe considerar que la presencia de cavidades no implica necesariamente una falla inminente, del mismo modo que la ausencia de defectos visibles no garantiza la integridad estructural. En consecuencia, la evaluación requiere integrar el estado de vigor del individuo, la extensión y localización del daño, la historia de intervenciones y las condiciones específicas del sitio, permitiendo una estimación más precisa del comportamiento estructural.

La documentación sistemática de las evaluaciones fortalece la consistencia técnica y la trazabilidad de las decisiones, al generar registros verificables que sustentan las intervenciones realizadas. Este componente resulta especialmente relevante en contextos urbanos donde la gestión del arbolado implica responsabilidades técnicas y administrativas.

El monitoreo periódico se consolida como una herramienta central dentro de la gestión preventiva, al permitir la identificación de cambios progresivos en la estabilidad estructural antes de la ocurrencia de fallas. Este enfoque reduce la

incertidumbre, optimiza la asignación de recursos y mejora la capacidad de respuesta ante condiciones de riesgo.

En conjunto, la aplicación del principio de proporcionalidad permite establecer un equilibrio entre la seguridad pública y la conservación del arbolado urbano, integrando criterios técnicos, biológicos y de contexto dentro de un mismo marco de decisión. En Panamá, este enfoque adquiere especial relevancia debido a la interacción entre condiciones climáticas, características del suelo y presión urbana, lo que exige procesos de evaluación rigurosos y adaptativos.

1.7 Cargas dinámicas, estacionalidad tropical y exposición urbana

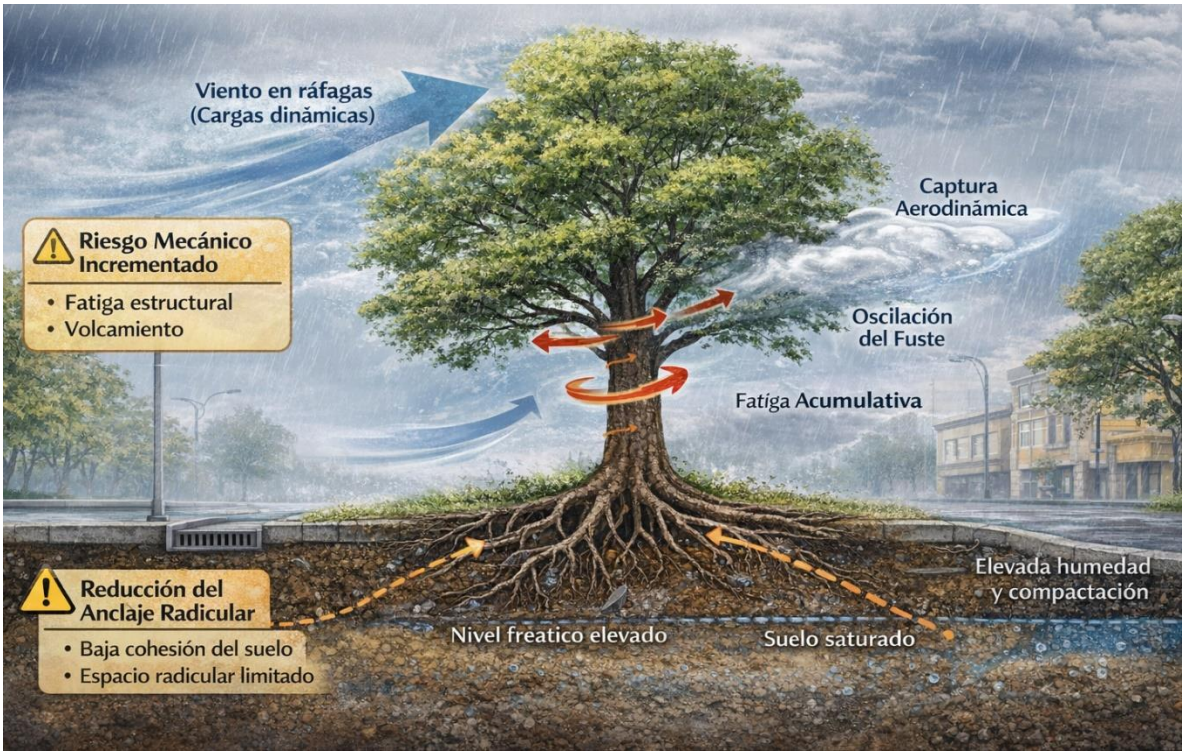
En el contexto urbano de Panamá, las cargas dinámicas inducidas por el viento constituyen uno de los principales factores que condicionan la estabilidad estructural del arbolado. La respuesta del árbol frente al viento no depende únicamente de la velocidad promedio, sino de la naturaleza turbulenta del flujo y de la interacción aerodinámica con la arquitectura de la copa. Estas condiciones generan cargas cíclicas que redistribuyen esfuerzos internos, favoreciendo la acumulación de tensiones y procesos de fatiga estructural en fustes y ramas (Nicoll & Ray, 2020; Ruiz-Benito et al., 2021).

La estacionalidad climática introduce un factor adicional de complejidad. Durante eventos de precipitación intensa, la saturación del suelo reduce la resistencia al corte y disminuye la capacidad de anclaje del sistema radical, particularmente en suelos compactados o con volumen radicular restringido por infraestructura urbana. Esta condición incrementa la susceptibilidad al volcamiento, incluso en individuos que presentan apariencia foliar vigorosa (Valente et al., 2022).

Como se ilustra en la Figura 1.5, la combinación de cargas dinámicas inducidas por el viento y la pérdida temporal de resistencia del suelo genera un escenario de inestabilidad estructural en el que se amplifican tanto los esfuerzos de flexión en el fuste como las tensiones en el sistema radical.

Figura 1.5

Interacción entre cargas dinámicas del viento y reducción del anclaje radicular en suelos saturados.



Nota. La figura muestra cómo la acción del viento genera oscilación del fuste y acumulación de tensiones, mientras que la saturación del suelo disminuye la resistencia al corte y reduce la capacidad de anclaje radicular. Esta interacción incrementa la probabilidad de volcamiento y falla estructural en entornos urbanos. Elaboración propia.

La interacción entre viento y condiciones edáficas define un escenario de carga combinada en el que la estabilidad no puede interpretarse a partir de variables aisladas. La respuesta estructural del árbol resulta de la integración entre la geometría del individuo, la distribución de biomasa, la calidad del anclaje radicular y las características del entorno construido.

El análisis contemporáneo del riesgo arbóreo incorpora tres dimensiones interdependientes: la condición estructural del árbol, las características del sitio y el nivel de exposición. La integración de estas variables permite estimar de

manera más precisa la probabilidad de falla y sus consecuencias, orientando la priorización de intervenciones bajo criterios técnicos consistentes (Tomao et al., 2019; Bräuner et al., 2023).

Este enfoque evita tanto la sobreintervención como la subestimación del riesgo, al vincular la evaluación estructural con el contexto urbano en el que se inserta el individuo. En consecuencia, la gestión del arbolado urbano requiere interpretar las cargas dinámicas dentro de un marco sistémico que articule condiciones climáticas, propiedades del suelo y niveles de exposición, fortaleciendo la coherencia técnica en la toma de decisiones.

1.7.1 Respuesta del árbol ante cargas dinámicas

Durante eventos de viento, el árbol se comporta como un sistema estructural flexible capaz de deformarse y redistribuir esfuerzos a lo largo del eje raíz–fuste–copa. Esta capacidad de oscilación constituye un mecanismo de disipación de energía que reduce la concentración de tensiones en condiciones normales de carga (Peltola, 2006).

La respuesta dinámica del árbol está determinada por su geometría, la distribución de biomasa y las propiedades mecánicas de la madera. La interacción entre estos factores define el patrón de deformación y la capacidad de amortiguación frente a cargas cíclicas. Sin embargo, la repetición de esfuerzos asociados a ráfagas de viento puede inducir procesos de fatiga estructural, particularmente en individuos con defectos preexistentes, uniones débiles o configuraciones estructurales desfavorables, como codominancias mal desarrolladas.

El momento de flexión inducido por el viento depende de la altura del individuo, la arquitectura y densidad de la copa, así como del grado de exposición lateral. Árboles ubicados en espacios abiertos —como avenidas, estacionamientos o intersecciones— experimentan mayores solicitaciones mecánicas debido a la ausencia de barreras que disipen la energía del viento, en contraste con

individuos parcialmente protegidos por edificaciones u otros elementos del entorno construido.

Desde una perspectiva biomecánica, la respuesta del árbol a cargas dinámicas no es uniforme en el tiempo, sino que varía en función de la intensidad, duración y frecuencia del viento. Esta variabilidad refuerza la necesidad de considerar el comportamiento dinámico dentro de la evaluación estructural, integrando tanto las características del individuo como las condiciones del sitio en el que se desarrolla.

1.7.2 Saturación del suelo y reducción del anclaje

En el contexto urbano de Panamá, la interacción entre cargas dinámicas del viento y la saturación del suelo constituye uno de los principales mecanismos asociados al volcamiento del arbolado. La precipitación intensa incrementa el contenido de humedad del suelo y reduce su resistencia al corte, disminuyendo la capacidad de anclaje del sistema radical, especialmente en suelos compactados o con estructura degradada (Day et al., 2010).

La estabilidad del árbol depende de la interacción entre la arquitectura radicular y las propiedades físicas del suelo. Cuando la cohesión y la fricción interna se ven temporalmente reducidas por saturación, la transferencia de cargas desde el fuste hacia el suelo se vuelve menos eficiente, aumentando la probabilidad de falla por rotación o desprendimiento del sistema raíz–suelo. Bajo estas condiciones, individuos con fustes estructuralmente íntegros pueden fallar debido a la pérdida de estabilidad en la base, evidenciando que la integridad del fuste no es un indicador suficiente de estabilidad global.

Este comportamiento adquiere mayor relevancia cuando coexiste con restricciones radiculares propias del entorno urbano, tales como pavimentos, zanjas de servicios o compactación severa, que limitan el desarrollo del sistema radical y reducen el volumen de suelo estructural disponible para el anclaje. En estos escenarios, la respuesta del árbol frente a cargas dinámicas se encuentra

condicionada por un sistema raíz–suelo debilitado, lo que incrementa la susceptibilidad al volcamiento.

La evidencia científica sintetizada por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2022) señala que el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos incrementa la vulnerabilidad de las infraestructuras urbanas, incluida la infraestructura verde. Esta tendencia refuerza la necesidad de incorporar criterios de adaptación climática en la planificación y gestión del arbolado urbano, integrando variables hidrológicas, edáficas y de exposición dentro de los procesos de evaluación y toma de decisiones.

1.7.3 Integración del riesgo en condiciones de carga combinada

La estabilidad del arbolado urbano no puede interpretarse a partir de la acción aislada de factores individuales, sino como el resultado de la interacción simultánea entre cargas dinámicas, condiciones edáficas y características estructurales del árbol. La combinación de viento, saturación del suelo y limitaciones radiculares configura escenarios de carga compleja en los que la probabilidad de falla aumenta de manera no lineal.

En estos contextos, la respuesta estructural del árbol depende de la capacidad del sistema raíz–fuste–copa para redistribuir esfuerzos y mantener el equilibrio mecánico frente a solicitaciones variables. La presencia de defectos estructurales, configuraciones de copa desfavorables o sistemas radiculares restringidos puede amplificar los efectos de estas cargas combinadas, incrementando la susceptibilidad al volcamiento o fractura.

La evaluación del riesgo arbóreo requiere, por tanto, integrar de manera simultánea la condición estructural del individuo, las características del sitio y el nivel de exposición. Este enfoque permite estimar no solo la probabilidad de falla, sino también la probabilidad de impacto y la magnitud de las consecuencias, elementos esenciales para la priorización de intervenciones bajo criterios técnicos consistentes.

La interpretación de escenarios de carga combinada adquiere especial relevancia en el contexto urbano de Panamá, donde la coexistencia de eventos de lluvia intensa, suelos con limitaciones físicas y alta densidad de infraestructura incrementa la complejidad del análisis estructural. En estos entornos, la evaluación debe orientarse hacia la identificación de condiciones críticas que resultan de la convergencia de múltiples factores, más que de la presencia aislada de defectos visibles.

Este enfoque integrado permite reducir la incertidumbre en la toma de decisiones, evitar intervenciones innecesarias y priorizar acciones en aquellos individuos que presentan mayor nivel de riesgo efectivo. En consecuencia, la gestión del arbolado urbano se consolida como un proceso técnico basado en la comprensión de sistemas complejos, donde la interacción entre variables estructurales, ambientales y sociales define el comportamiento del árbol dentro del sistema urbano.

1.7.4 Exposición y consecuencia en el entorno urbano

El análisis del riesgo arbóreo trasciende la probabilidad de falla e incorpora la magnitud de las consecuencias asociadas a la ubicación del individuo dentro del entorno urbano. En la Ciudad de Panamá, la alta densidad vehicular y peatonal en corredores principales incrementa el nivel de exposición, elevando la probabilidad de impacto sobre personas, infraestructura y bienes.

Las metodologías de evaluación estructurada desarrolladas por la International Society of Arboriculture integran de manera simultánea la condición del árbol, las características del sitio y el nivel de exposición, considerando la presencia de dianas potenciales como un elemento central en la estimación del riesgo (Dunster et al., 2017). Este enfoque permite priorizar intervenciones con base en el riesgo efectivo, evitando decisiones sustentadas únicamente en la apariencia de defectos estructurales.

La interacción entre exposición urbana y condiciones ambientales introduce una dimensión adicional de complejidad. La estacionalidad climática, caracterizada

por eventos de lluvia intensa y episodios de viento asociados a tormentas convectivas, influye directamente en la estabilidad del arbolado y en la probabilidad de ocurrencia de fallas. En este sentido, la evaluación del riesgo debe ajustarse a estas condiciones dinámicas, incorporando criterios temporales dentro de los protocolos de monitoreo.

La implementación de inspecciones previas y posteriores a eventos climáticos, la priorización de áreas con alta exposición, la evaluación sistemática de las condiciones del suelo y la planificación adecuada del espacio radicular en nuevas plantaciones constituyen elementos fundamentales para una gestión preventiva eficaz.

La documentación técnica posterior a eventos extremos permite fortalecer la trazabilidad institucional y mejorar la consistencia en la toma de decisiones, al generar evidencia empírica sobre el comportamiento del arbolado bajo condiciones críticas. En consecuencia, la gestión del arbolado urbano en Panamá requiere integrar de manera explícita la interacción entre clima, suelo y exposición, reconociendo que la estabilidad estructural responde a un sistema dinámico condicionado tanto por variables ambientales como por la ocupación del espacio urbano.

1.8 Modelo de trazabilidad técnica y gobernanza proporcional al riesgo

El reconocimiento del arbolado urbano como infraestructura viva implica que las decisiones de manejo deben sustentarse en criterios técnicos verificables, sistemáticamente documentados y consistentes en el tiempo. En el ámbito municipal, la trazabilidad se configura como un principio fundamental de gobernanza, al permitir la justificación de las intervenciones, garantizar la coherencia institucional y reducir la variabilidad asociada a la interpretación individual.

La gestión del arbolado urbano debe estructurarse como un proceso continuo que articula la observación objetiva del árbol y del sitio con una interpretación técnica

basada en fundamentos biológicos, biomecánicos y contextuales. Este proceso conduce a la clasificación del nivel de riesgo, la definición de medidas proporcionales, la generación de registros estandarizados y el seguimiento periódico de cada individuo, consolidando un sistema de gestión basado en evidencia.

Las metodologías de evaluación estructurada, como las desarrolladas por la International Society of Arboriculture, establecen que la probabilidad de falla debe analizarse juntamente con la probabilidad de impacto y la severidad de las consecuencias (Dunster et al., 2017). Este enfoque integra de manera simultánea la condición del árbol, las características del sitio y el nivel de exposición, proporcionando un marco técnico robusto para la priorización de intervenciones dentro de la gestión municipal.

La incorporación de sistemas de registro georreferenciado y bases de datos actualizadas permite vincular la evaluación individual con la planificación urbana, facilitando la identificación de zonas críticas, la asignación eficiente de recursos y la programación de intervenciones preventivas. Este componente fortalece la transparencia y la rendición de cuentas en la gestión del arbolado urbano.

En Panamá, la aplicación de este modelo adquiere especial relevancia debido a la interacción entre condiciones climáticas, restricciones edáficas y alta exposición urbana, factores que incrementan la complejidad del análisis y la necesidad de decisiones técnicamente sustentadas. En este contexto, la gobernanza proporcional al riesgo permite equilibrar la seguridad pública con la conservación del arbolado, integrando criterios científicos, operativos y normativos dentro de un mismo sistema de gestión.

1.8.2 Documentación y consistencia institucional

La gestión del arbolado urbano requiere un sistema de documentación técnica que garantice la trazabilidad de las evaluaciones y la coherencia en la toma de decisiones. La ausencia de registros verificables incrementa la incertidumbre, limita la continuidad operativa y puede derivar en controversias legales, afectando la credibilidad institucional.

Cada evaluación debe registrarse mediante instrumentos estandarizados que permitan identificar el individuo y su ubicación georreferenciada, así como documentar la condición estructural, los defectos observados, las características del sitio, el nivel de exposición, la recomendación técnica y la identificación del evaluador junto con la fecha de inspección. Este nivel de detalle asegura la reproducibilidad de la evaluación y facilita su validación técnica.

La sistematización de la información permite construir historiales individuales que reflejan la evolución estructural y fisiológica del árbol a lo largo del tiempo. Estos registros constituyen una base fundamental para el monitoreo, la priorización de intervenciones y la evaluación de la efectividad de las acciones de manejo.

La integración de estos datos en plataformas georreferenciadas fortalece la gestión a escala urbana, al permitir la identificación de patrones espaciales, la delimitación de zonas de riesgo y la optimización de la asignación de recursos. Este enfoque contribuye a consolidar una gestión basada en evidencia, alineada con principios de transparencia, responsabilidad institucional y mejora continua.

La documentación sistemática respalda técnicamente las intervenciones y fortalece la consistencia institucional al establecer criterios homogéneos de evaluación y reducir la variabilidad en la interpretación del riesgo. La trazabilidad se consolida como un componente esencial para una gestión del arbolado urbano orientada a la sostenibilidad y la seguridad pública.

1.8.3 Integración con planificación urbana

La gobernanza del arbolado urbano requiere una articulación efectiva con la planificación territorial, las obras públicas y las políticas ambientales. La infraestructura verde debe incorporarse dentro de los instrumentos de desarrollo urbano como un componente estructural, capaz de contribuir a la resiliencia, funcionalidad y calidad ambiental de las ciudades (FAO, 2016).

En Panamá, el crecimiento urbano acelerado y la presión sobre los espacios disponibles demandan una integración explícita del arbolado dentro de los procesos de planificación. Esta incorporación permite anticipar conflictos con la infraestructura, optimizar la distribución espacial de la cobertura arbórea y fortalecer su contribución a la regulación ambiental y al bienestar urbano.

El modelo de trazabilidad técnica y gobernanza proporcional al riesgo establece que toda intervención debe sustentarse en evaluaciones fundamentadas, con decisiones consistentes, justificables y respaldadas por documentación técnica. La planificación preventiva adquiere un papel central al reducir la necesidad de intervenciones reactivas y facilitar la compatibilidad entre los objetivos de conservación y los requerimientos de seguridad pública.

La gestión del arbolado urbano se sustenta en la integración de fundamentos biológicos, biomecánicos y climáticos dentro de un marco de gobernanza técnica orientado por el análisis de riesgo. Este enfoque permite superar esquemas fragmentados y establecer criterios consistentes para la evaluación, documentación y planificación del arbolado en el sistema urbano.

El reconocimiento del árbol como infraestructura viva estratégica consolida una base conceptual que orienta el desarrollo de las herramientas técnicas necesarias para la identificación, diagnóstico, manejo y conservación del arbolado urbano, integrando ciencia, planificación y gestión dentro de un mismo marco operativo.

10.69821/978-628-97750-2-0

CAPÍTULO II

BASES MORFOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES DEL ÁRBOL URBANO PARA SU EVALUACIÓN TÉCNICA

La evaluación técnica del arbolado urbano exige comprender al árbol como una estructura biológica organizada, cuya morfología, anatomía y comportamiento mecánico determinan su estabilidad y desempeño dentro del sistema urbano. El análisis estructural no puede sustentarse en la observación superficial, sino en la interpretación integrada de los procesos de crecimiento, diferenciación tisular y respuesta frente a cargas externas (Niklas, 1992; Evert & Eichhorn, 2013).

Las condiciones urbanas modifican de manera significativa la arquitectura del árbol. La restricción del volumen radicular, la compactación del suelo, las intervenciones de poda y la interferencia con infraestructura alteran la distribución de biomasa y la formación de tejidos estructurales, generando configuraciones distintas a las observadas en ecosistemas naturales (Day et al., 2010; Livesley et al., 2016). Estas modificaciones influyen directamente en la transferencia de cargas y en la respuesta biomecánica del individuo.

El análisis morfológico y estructural constituye la base para la evaluación del riesgo arbóreo, al permitir interpretar los signos visibles en función de procesos internos y comprender su implicación en la estabilidad del árbol. La identificación de defectos estructurales, la evaluación de la arquitectura del fuste y la copa, así como la comprensión del sistema radical, requieren un enfoque técnico que articule biología, mecánica y condiciones del sitio.

Este capítulo desarrolla los fundamentos necesarios para la interpretación estructural del arbolado urbano, estableciendo los criterios que sustentan su evaluación técnica y su aplicación en la gestión del riesgo en entornos urbanos.

2.1 Organización morfológica general del árbol urbano

El análisis técnico del arbolado urbano se sustenta en la comprensión del árbol como un sistema biológico estructuralmente organizado, en el que múltiples unidades funcionales operan de manera interdependiente. Desde la perspectiva botánica, el árbol corresponde a una planta leñosa perenne caracterizada por crecimiento secundario, diferenciación anatómica compleja y la capacidad de desarrollar estructuras aéreas de gran porte sostenidas por un sistema vascular altamente especializado (Raven et al., 2013; Evert & Eichhorn, 2013).

La organización morfológica se articula en tres componentes fundamentales: sistema radical, fuste y copa. Estos elementos conforman un sistema integrado cuya interacción determina tanto la estabilidad mecánica como la viabilidad fisiológica del individuo en el entorno urbano.

El sistema radical cumple funciones de absorción, anclaje y almacenamiento, constituyendo el elemento responsable de la transferencia de cargas hacia el suelo. En entornos urbanos, su desarrollo se encuentra condicionado por la compactación, la limitación del volumen edáfico disponible y la interferencia con infraestructura subterránea. Estas restricciones modifican la arquitectura radicular y reducen la capacidad de anclaje, especialmente en suelos con baja cohesión o sometidos a saturación hídrica (Day et al., 2010).

El fuste actúa como eje estructural primario y como elemento de transmisión de esfuerzos entre la copa y el sistema radical. Está constituido por tejidos secundarios derivados de la actividad del cambium vascular, incluyendo xilema secundario y floema secundario. La madera presenta un comportamiento mecánico anisotrópico, cuya resistencia depende de la orientación de las fibras, el contenido de humedad y la presencia de discontinuidades internas (Niklas, 1992). La evaluación del fuste en entornos urbanos debe considerar simultáneamente su condición externa y la posible existencia de degradación interna asociada a procesos de deterioro.

La copa representa el sistema aéreo encargado de la captación de radiación y del intercambio gaseoso. Su arquitectura, definida por la densidad foliar, la distribución de ramas y la presencia de asimetrías, condiciona la interacción aerodinámica con el viento. Esta interacción determina la magnitud y distribución de las cargas dinámicas transmitidas al fuste y al sistema radical, influyendo directamente en la estabilidad global del árbol (Peltola, 2006).

El sistema raíz–fuste–copa opera como una unidad funcional continua, en la que los procesos fisiológicos y las solicitaciones mecánicas se integran de manera simultánea. Las alteraciones en cualquiera de sus componentes generan efectos en cascada sobre el conjunto del sistema. La reducción de la copa modifica la distribución de cargas y el balance fisiológico, mientras que un sistema radical comprometido limita la capacidad de anclaje aun cuando la copa mantenga apariencia vigorosa.

La evaluación del arbolado urbano requiere, por tanto, un enfoque morfoestructural integrado que permita interpretar los indicadores visibles en función de procesos internos, estimar la estabilidad potencial del individuo y sustentar decisiones de manejo coherentes con su funcionamiento biológico y mecánico

2.2 Sistema radical y anclaje en suelos urbanos

l sistema radical constituye el componente estructural primario responsable del anclaje mecánico del árbol al suelo y del abastecimiento hídrico y nutricional. Su configuración espacial y su integridad funcional determinan de manera directa la estabilidad del individuo y su capacidad de respuesta frente a cargas externas (Raven et al., 2013).

En condiciones naturales, las raíces se distribuyen predominantemente en los horizontes superficiales del suelo, donde se concentra la mayor disponibilidad de oxígeno, humedad y materia orgánica. En la mayoría de las especies arbóreas, más del 80 % de la biomasa radical se localiza en los primeros 60 cm del perfil edáfico, lo que evidencia la alta dependencia de estos estratos para el desarrollo

estructural y fisiológico (Day et al., 2010). Esta distribución implica que cualquier alteración en los horizontes superficiales tiene efectos directos sobre la arquitectura radicular y, en consecuencia, sobre la estabilidad del árbol.

En entornos urbanos, el volumen efectivo de suelo disponible suele encontrarse severamente restringido por la presencia de infraestructura subterránea, cimentaciones, redes de servicios y superficies impermeables. La compactación incrementa la densidad aparente del suelo, reduce la macroporosidad y limita la infiltración de agua y la difusión de oxígeno, afectando tanto la absorción como el desarrollo estructural de las raíces (Day et al., 2010). Bajo estas condiciones, el sistema radical tiende a desarrollar configuraciones superficiales, discontinuas o asimétricas, lo que reduce la capacidad de anclaje frente a cargas dinámicas.

Desde la perspectiva biomecánica, el anclaje no depende exclusivamente de la profundidad del sistema radical, sino de la interacción entre raíces estructurales y suelo circundante. La estabilidad se relaciona con la extensión lateral de las raíces primarias, la densidad de raíces secundarias y las propiedades físicas del suelo, particularmente su cohesión y resistencia al corte (Niklas, 1992). Este sistema actúa como una matriz de transferencia de cargas en la que el suelo cumple un papel activo en la disipación de esfuerzos.

Durante eventos de precipitación intensa, la saturación del suelo reduce temporalmente la resistencia al corte y la fricción interna, disminuyendo la capacidad de anclaje del sistema radical. Este fenómeno resulta especialmente crítico en suelos compactados o con volumen radicular restringido, donde la interacción raíz–suelo ya se encuentra comprometida. Bajo estas condiciones, la probabilidad de volcamiento aumenta de manera significativa, incluso en individuos que no presentan defectos evidentes en el fuste o la copa.

Las intervenciones urbanas representan un factor adicional de inestabilidad. El corte de raíces durante obras civiles altera la distribución de cargas y genera pérdidas de anclaje que pueden no manifestarse de forma inmediata. La reducción parcial del sistema radical produce desequilibrios mecánicos que

incrementan la susceptibilidad del árbol frente a eventos dinámicos, particularmente en escenarios de alta exposición.

La evaluación técnica del sistema radical requiere la identificación de indicadores indirectos que permitan inferir su condición. La inspección del cuello radicular, la presencia de raíces expuestas, el levantamiento de pavimentos, la inclinación progresiva del fuste y la asimetría en el desarrollo de la copa constituyen señales relevantes para la interpretación del estado del anclaje. La presencia de raíces superficiales prominentes puede reflejar procesos adaptativos frente a la compactación o a la limitación del volumen edáfico disponible.

El sistema radical debe considerarse un componente central en la evaluación estructural del arbolado urbano. Su análisis permite comprender la estabilidad del individuo en relación con las condiciones del suelo y las intervenciones antrópicas, aportando elementos fundamentales para la toma de decisiones en la gestión municipal y en la planificación preventiva del arbolado urbano.

2.3 Fuste, crecimiento secundario y resistencia mecánica

El fuste constituye el eje estructural primario del árbol y actúa como elemento de soporte y de conducción vascular entre el sistema radical y la copa. Su desarrollo está determinado por la actividad del cambium vascular, meristemo lateral responsable de la formación de xilema secundario hacia el interior y floema secundario hacia el exterior, proceso que sustenta el crecimiento radial y la consolidación estructural del individuo (Raven et al., 2013; Evert & Eichhorn, 2013).

El xilema secundario, o madera, presenta un comportamiento mecánico anisotrópico, condicionado por la orientación de sus fibras, el contenido de humedad y la integridad del tejido. La resistencia es mayor en dirección longitudinal que en sentido perpendicular a la fibra, lo que define la forma en que el fuste responde a esfuerzos de flexión, compresión y tracción (Niklas, 1992). Esta propiedad resulta determinante en la evaluación estructural, ya que las

cargas inducidas por el viento generan distribuciones complejas de tensiones dentro del fuste.

El crecimiento secundario incrementa progresivamente el diámetro del fuste y la sección resistente disponible para soportar cargas mecánicas. En regiones tropicales, donde la estacionalidad no siempre genera anillos claramente definidos, la lignificación y acumulación de biomasa leñosa se mantienen como procesos continuos que refuerzan la estructura del árbol a lo largo del tiempo. Este aumento de sección constituye el principal mecanismo de adaptación frente a cargas crecientes.

Ante condiciones de carga asimétrica o inclinación, el árbol desarrolla madera de reacción como respuesta adaptativa orientada a restablecer el equilibrio mecánico. En angiospermas, esta se forma como madera de tensión en el lado superior del fuste inclinado, mientras que en gimnospermas se produce madera de compresión en el lado inferior (Raven et al., 2013). La formación diferencial de estos tejidos modifica la distribución interna de tensiones y contribuye a la estabilidad del individuo en entornos donde las cargas no son uniformes.

La resistencia mecánica del fuste puede verse comprometida por defectos estructurales como cavidades, grietas longitudinales, inclusiones de corteza en uniones codominantes y procesos de degradación interna. El modelo CODIT descrito por Shigo (1984) explica que el árbol responde al daño mediante la compartimentación del tejido afectado, generando barreras anatómicas y químicas que limitan la propagación del deterioro. Este mecanismo no implica la recuperación de la resistencia original, sino la contención del daño dentro de compartimentos funcionalmente aislados.

Desde la perspectiva biomecánica, la estabilidad del fuste depende de la relación entre el momento de flexión inducido por el viento y la resistencia residual de la sección transversal. La reducción de la sección efectiva, producto de cavidades o descomposición interna, incrementa la concentración de tensiones en la pared

remanente y eleva la probabilidad de falla bajo cargas dinámicas (Niklas, 1992; Peltola, 2006).

En entornos urbanos, la evaluación del fuste requiere una inspección sistemática orientada a identificar indicadores de deterioro estructural. La presencia de exudaciones, deformaciones, abultamientos, grietas, cambios abruptos en el patrón de crecimiento y uniones codominantes con inclusiones de corteza constituyen señales relevantes para la interpretación del riesgo estructural (Mattheck & Breloer, 1994). Estos elementos deben analizarse en conjunto con la geometría del árbol y las condiciones del sitio.

El análisis del fuste debe integrar principios anatómicos, fisiológicos y biomecánicos para estimar la resistencia efectiva del tejido leñoso y su evolución en el tiempo. Este enfoque permite interpretar de manera rigurosa la estabilidad estructural del árbol y sustentar decisiones de manejo coherentes con su condición real.

2.4 Arquitectura de copa y distribución de cargas

La copa constituye el sistema aéreo encargado de la captación de radiación y del intercambio gaseoso; desde la perspectiva estructural, representa la principal interfaz de interacción con el viento. Su arquitectura —definida por la disposición tridimensional de ramas primarias y secundarias, la densidad foliar, la rugosidad superficial y la presencia de asimetrías— condiciona la magnitud, dirección y variabilidad temporal de las cargas aerodinámicas transmitidas al fuste y al sistema radical (Peltola, 2006).

En condiciones no perturbadas, la arquitectura de copa responde a determinantes genéticos y a gradientes de competencia por luz. En entornos urbanos, la forma final resulta de la interacción entre crecimiento biológico e intervenciones antrópicas, particularmente podas, restricciones espaciales e interferencias con infraestructura. Estas modificaciones alteran la distribución de biomasa y el centro de masa del individuo, afectando la relación entre altura total y diámetro

del fuste (H/D), parámetro asociado al comportamiento frente a cargas laterales (Niklas, 1992).

Desde el punto de vista biomecánico, la fuerza ejercida por el viento sobre la copa depende de su área proyectada, su porosidad y su capacidad de deformación. La copa no actúa como una superficie rígida: bajo condiciones de viento, experimenta reconfiguración aerodinámica mediante la flexión de ramas y la reorientación foliar, lo que reduce parcialmente la resistencia al flujo y redistribuye las tensiones internas. Este comportamiento flexible permite disipar energía, aunque también introduce ciclos repetitivos de carga que pueden inducir fatiga estructural en tejidos debilitados (Peltola, 2006).

La distribución de cargas dentro del árbol se ve influida por la geometría de la copa. Configuraciones densas y relativamente equilibradas tienden a distribuir los esfuerzos de manera más homogénea, mientras que copas asimétricas, desbalanceadas o con dominancias múltiples generan concentraciones de tensión que incrementan la probabilidad de falla en puntos específicos del fuste o en las uniones de ramas. Las estructuras codominantes con inclusiones de corteza representan configuraciones particularmente vulnerables bajo cargas dinámicas (Mattheck & Breloer, 1994).

La relación altura–diámetro (H/D) se emplea como indicador de esbeltez y estabilidad potencial. Valores elevados reflejan estructuras más susceptibles a deformaciones bajo cargas laterales, especialmente cuando el sistema radical presenta limitaciones de desarrollo. Sin embargo, este indicador adquiere significado únicamente cuando se interpreta en conjunto con la densidad de la madera, la arquitectura de la copa y las condiciones del sitio, dado que la estabilidad es el resultado de una interacción multifactorial (Niklas, 1992; Peltola, 2006; Kane & Ryan, 2004).

Las intervenciones silviculturales influyen de manera directa en la configuración estructural de la copa. Podas severas reducen abruptamente la superficie foliar y modifican la distribución de cargas, lo que puede inducir la formación de brotes

epicórmicos con inserciones estructuralmente débiles. La eliminación selectiva de ramas puede desplazar el centro de masa y aumentar los momentos de flexión en la base del fuste, particularmente en individuos expuestos. Estas alteraciones generan nuevas condiciones de carga que deben ser consideradas en evaluaciones posteriores.

La interacción entre la copa y el entorno construido determina el grado de exposición aerodinámica. Árboles aislados en avenidas amplias, estacionamientos o espacios abiertos presentan mayor captación de viento debido a la ausencia de barreras que disipen el flujo. En contraste, individuos ubicados en corredores arbolados o protegidos por edificaciones experimentan una reducción relativa de las cargas. Esta variabilidad espacial adquiere especial relevancia en ciudades tropicales, donde las tormentas convectivas generan ráfagas intensas y cambios abruptos en la dirección del viento.

La arquitectura de copa constituye un componente determinante en la estabilidad global del árbol. Su configuración controla la generación, transmisión y redistribución de cargas dentro del sistema raíz–fuste–copa, integrando variables biológicas, geométricas y ambientales. Su análisis permite interpretar el comportamiento estructural del individuo frente a cargas dinámicas y sustentar decisiones de manejo orientadas a la reducción del riesgo sin comprometer su funcionalidad ecológica.

2.5 Principios biológicos del daño y compartimentación (CODIT)

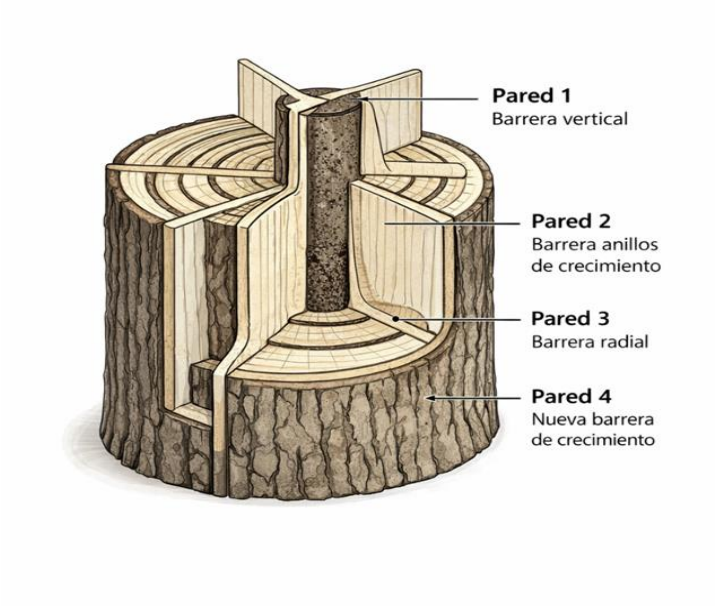
Los árboles, como organismos vivos, no restauran el tejido dañado a su condición estructural original. En su lugar, activan mecanismos biológicos orientados a aislar el deterioro y limitar su propagación interna. Este proceso fue conceptualizado por Shigo (1984) mediante el modelo CODIT (*Compartmentalization of Decay in Trees*), que describe la respuesta del árbol frente a heridas mecánicas, infecciones y procesos de descomposición.

El modelo establece que el árbol desarrolla un sistema de barreras anatómicas y químicas que restringen el avance del deterioro en diferentes direcciones. Las tres

primeras barreras corresponden a estructuras preexistentes del xilema que limitan la propagación longitudinal y radial del daño, mientras que la cuarta barrera —formada por la actividad del cambium— genera nuevo tejido leñoso que aísla el área afectada del crecimiento posterior (Shigo, 1984; Mattheck & Breloer, 1994). Como se observa en la Figura 2.1, estas barreras configuran un sistema tridimensional de contención que define la dinámica interna del deterioro.

Figura 2.1

Modelo tridimensional de compartimentación del daño (CODIT).



Nota. Esquema conceptual basado en el modelo propuesto por Shigo (1984). Elaboración propia.

Este mecanismo no implica la eliminación del tejido degradado ni la recuperación de la resistencia mecánica original. La formación de cavidades, pudriciones o zonas de descomposición reduce la sección transversal efectiva del fuste, afectando su capacidad de soportar cargas. Desde la perspectiva biomecánica, la resistencia estructural depende de la proporción de madera funcional remanente, la cual determina la respuesta del árbol frente a esfuerzos de flexión inducidos por el viento (Niklas, 1992).

En entornos urbanos, las heridas se originan por múltiples factores, incluyendo podas inadecuadas, impactos mecánicos, intervenciones de infraestructura y

daños recurrentes en el sistema radical o el fuste. La repetición de estas perturbaciones puede superar la capacidad de compartimentación del árbol, facilitando la colonización por organismos xilófagos y acelerando los procesos de degradación interna.

La interpretación de los defectos visibles requiere un enfoque técnico riguroso. Manifestaciones externas como grietas longitudinales, exudaciones, abultamientos o depresiones en la corteza pueden asociarse a procesos internos activos; sin embargo, la expresión externa del daño no siempre refleja la magnitud real de la degradación estructural. Esta discrepancia obliga a integrar la inspección visual con el análisis del entorno, el historial del individuo y, cuando sea necesario, el uso de herramientas de diagnóstico complementarias.

La comprensión del modelo CODIT permite interpretar el daño como un proceso dinámico en el que coexisten tejido funcional y tejido degradado. La estabilidad del árbol depende de la relación entre ambos, así como de la distribución espacial del deterioro dentro del fuste. En este sentido, la localización del defecto, su extensión y su interacción con las zonas de mayor solicitación mecánica constituyen variables críticas para la evaluación estructural.

En el ámbito de la gestión urbana, este enfoque evita interpretaciones simplificadas basadas únicamente en la presencia de cavidades visibles. La existencia de deterioro no implica necesariamente una falla inminente, pero sí una reducción de la capacidad estructural que debe ser evaluada en función de la geometría del árbol, la proporción de sección resistente remanente y el nivel de exposición. Este marco conceptual sustenta decisiones de manejo proporcionales al riesgo y coherentes con los principios de conservación y seguridad pública.

2.6 Indicadores estructurales observables en la evaluación técnica urbana

La comprensión anatómica y biomecánica del árbol urbano adquiere valor operativo cuando se traduce en criterios observables aplicables en campo. En el ámbito municipal, la evaluación inicial del arbolado se fundamenta en inspecciones visuales sistemáticas, apoyadas, cuando es necesario, por herramientas instrumentales. La identificación de indicadores estructurales permite inferir la estabilidad potencial del individuo sin recurrir de forma inmediata a métodos invasivos, optimizando la toma de decisiones en contextos urbanos complejos (Dunster et al., 2017).

Uno de los indicadores más utilizados es la relación altura–diámetro (H/D), que expresa el grado de esbeltez del árbol. Valores elevados se asocian con mayor susceptibilidad a deformaciones bajo cargas laterales, especialmente cuando el sistema radical presenta limitaciones de desarrollo. Su interpretación requiere considerar la especie, la densidad de la madera y las condiciones del sitio, dado que la estabilidad responde a una interacción multifactorial (Niklas, 1992; Peltola, 2006; Kane & Ryan, 2004).

La inclinación del fuste constituye un indicador dinámico de la interacción entre cargas y anclaje. Inclinaciones leves pueden corresponder a estados de equilibrio adaptativo; sin embargo, variaciones recientes en el ángulo, acompañadas de levantamiento del suelo, fisuración radial o exposición de raíces, sugieren pérdida de estabilidad en la base. La inspección del cuello radicular y de la zona de transición raíz–fuste resulta determinante para identificar desplazamientos estructurales.

Las uniones codominantes con inclusiones de corteza representan configuraciones de alta vulnerabilidad. Estas estructuras presentan baja resistencia a la tracción debido a la ausencia de conexión leñosa efectiva entre ejes, lo que favorece la separación bajo cargas dinámicas (Mattheck & Breloer, 1994). De forma complementaria, cavidades, grietas longitudinales, exudaciones o

deformaciones del fuste deben interpretarse como indicadores potenciales de deterioro interno, cuya magnitud puede requerir evaluación especializada.

La arquitectura de la copa proporciona información clave sobre la distribución de cargas. Asimetrías marcadas o desarrollos desbalanceados modifican el centro de masa del árbol y aumentan los momentos de flexión en la base del fuste. Estos patrones suelen asociarse a intervenciones reiteradas o a interferencias con infraestructura aérea, generando configuraciones estructurales que incrementan la susceptibilidad a la falla.

Las condiciones del entorno constituyen un componente inseparable de la evaluación estructural. Suelos compactados, pavimentos deformados por raíces superficiales, excavaciones recientes o alteraciones en el drenaje evidencian restricciones al desarrollo radicular y posibles compromisos en el anclaje. En regiones tropicales, la saturación del suelo durante eventos de precipitación reduce la resistencia al corte y modifica temporalmente la interacción raíz–suelo, incrementando la vulnerabilidad estructural (Peltola, 2006).

La interpretación de estos indicadores permite establecer una clasificación preliminar de la condición estructural del arbolado, orientando la necesidad de monitoreo, intervención o evaluación avanzada. Este enfoque gradual favorece decisiones proporcionales al nivel de riesgo, evitando intervenciones innecesarias y priorizando acciones en individuos con mayor probabilidad de falla y consecuencias asociadas.

En conjunto, los fundamentos morfológicos, anatómicos y biomecánicos desarrollados en este capítulo permiten comprender al árbol urbano como un sistema estructural integrado, cuya estabilidad depende de la interacción entre sistema radical, fuste y copa, así como de las condiciones del entorno. Esta base conceptual sustenta la evaluación diagnóstica y el análisis de riesgo, estableciendo un marco técnico coherente para la gestión del arbolado urbano en la Ciudad de Panamá.

10.69821/978-628-97750-2-0

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN TÉCNICA DEL ARBOLADO URBANO

La evaluación técnica del arbolado urbano constituye el eje operativo que articula los fundamentos biológicos, morfoestructurales y biomecánicos del árbol con la toma de decisiones en entornos urbanos. Este proceso permite caracterizar la condición del individuo, estimar su estabilidad estructural y determinar el nivel de riesgo asociado a su interacción con personas, infraestructura y bienes.

La evaluación arbórea se configura como un procedimiento sistemático, basado en la observación estructurada, la interpretación técnica y el análisis integrado del riesgo. Este enfoque incorpora principios de arboricultura, biomecánica y gestión urbana, permitiendo generar diagnósticos consistentes, reproducibles y técnicamente defendibles (Dunster et al., 2017; Koeser et al., 2020).

El proceso evaluativo se fundamenta en la integración de tres dimensiones principales: la condición estructural del árbol, las características del sitio y el nivel de exposición. La interacción entre estas variables permite estimar la probabilidad de falla y la magnitud de las consecuencias potenciales, estableciendo la base para la toma de decisiones proporcionales al riesgo.

En entornos urbanos, donde el arbolado coexiste con infraestructura, tránsito vehicular y peatonal, la evaluación técnica adquiere un carácter estratégico dentro de la gestión municipal. Su aplicación sistemática permite priorizar intervenciones, optimizar recursos y reducir la ocurrencia de fallas estructurales con impacto sobre la seguridad pública.

La metodología contemporánea de evaluación arbórea reconoce que el riesgo no es una propiedad inherente del árbol de manera aislada, sino el resultado de la interacción entre el individuo y su entorno. En consecuencia, la evaluación no se

limita a la identificación de defectos estructurales, sino que incorpora la dinámica del sitio, las condiciones edáficas, la exposición y la frecuencia de uso del espacio.

Este enfoque permite evitar decisiones basadas exclusivamente en la apariencia visual o en criterios subjetivos, sustituyéndolas por análisis técnicos que consideran la complejidad del sistema árbol–entorno. La estandarización de procedimientos y la documentación sistemática fortalecen la trazabilidad de las decisiones, facilitando su validación técnica y su respaldo institucional.

En el contexto de la Ciudad de Panamá, caracterizado por condiciones climáticas tropicales, alta humedad, eventos de lluvia intensa y suelos frecuentemente saturados, la evaluación técnica debe incorporar variables dinámicas que influyen en la estabilidad del arbolado. La consideración de estos factores permite ajustar los criterios de análisis a las condiciones locales, incrementando la precisión del diagnóstico y la eficacia de las intervenciones.

Este capítulo desarrolla el marco metodológico para la evaluación técnica del arbolado urbano, estableciendo los principios, procedimientos y criterios necesarios para la identificación de defectos estructurales, la estimación del riesgo y la formulación de recomendaciones de manejo coherentes con los objetivos de seguridad pública y conservación del arbolado.

3.1 Enfoque metodológico de evaluación del arbolado urbano

La evaluación técnica del arbolado urbano se define como un proceso sistemático orientado al análisis integrado de la condición estructural, fisiológica y sanitaria de los individuos establecidos en entornos urbanos. Este procedimiento se sustenta en protocolos estandarizados de arboricultura que permiten generar diagnósticos consistentes, reproducibles y técnicamente sustentados (Dunster et al., 2017; Smiley et al., 2017).

La metodología se organiza en una secuencia lógica que vincula la identificación de evidencias observables con su interpretación técnica y la definición de medidas

de manejo. Este enfoque permite transformar la información obtenida en campo en decisiones operativas coherentes con el nivel de riesgo asociado.

La observación comprende la identificación sistemática de indicadores estructurales y funcionales relacionados con el sistema radical, el fuste, la copa y el entorno inmediato. Este procedimiento incluye la detección de defectos visibles, alteraciones geométricas, signos de deterioro y condiciones del sitio que pueden influir en la estabilidad del árbol. La calidad de esta etapa determina la confiabilidad del análisis posterior.

La interpretación consiste en el análisis técnico de los indicadores observados a partir de principios anatómicos, fisiológicos y biomecánicos. Este análisis permite diferenciar entre respuestas adaptativas y señales de deterioro estructural, así como estimar la implicación de cada indicador en la estabilidad del individuo. La evaluación integra el comportamiento del sistema raíz–fuste–copa con las características del sitio (Mattheck & Breloer, 1994; Dunster et al., 2017).

La toma de decisiones se orienta a la definición de acciones de manejo en función del nivel de riesgo estimado. Estas acciones incluyen monitoreo periódico, intervenciones correctivas o la aplicación de técnicas de evaluación avanzada. La decisión se fundamenta en el principio de proporcionalidad, ajustando la intensidad de la intervención a la probabilidad de falla y a la magnitud de las consecuencias potenciales (Smiley et al., 2017).

El proceso evaluativo integra tres dimensiones fundamentales: la condición estructural del árbol, las características del sitio —incluyendo propiedades del suelo y restricciones físicas— y el nivel de exposición asociado a la presencia de dianas potenciales. La interacción entre estas variables permite estimar el riesgo como una función de la probabilidad de falla y la severidad de sus consecuencias.

La aplicación de este enfoque elimina la dependencia de juicios subjetivos basados exclusivamente en la apariencia visual y promueve una evaluación sustentada en evidencia observable y principios científicos. La estandarización del

procedimiento fortalece la consistencia técnica, facilita la trazabilidad de las decisiones y respalda la gestión institucional del arbolado urbano.

En ciudades tropicales como la Ciudad de Panamá, la evaluación incorpora variables climáticas y edáficas que influyen en la estabilidad del arbolado, incluyendo la alta humedad, la estacionalidad de lluvias y la saturación periódica del suelo. La consideración de estos factores permite ajustar el análisis a las condiciones locales y mejorar la precisión del diagnóstico.

3.2 Componentes de la evaluación estructural

La evaluación estructural del arbolado urbano se organiza mediante un análisis sistemático de los componentes funcionales del árbol en relación con las condiciones del sitio. Este enfoque permite interpretar la estabilidad del individuo a partir de la interacción entre sus elementos biológicos y las características del entorno donde se desarrolla.

La inspección técnica se estructura en cuatro componentes principales: sistema radical, fuste, copa y entorno inmediato. Cada uno aporta información específica sobre la estabilidad mecánica y el comportamiento del árbol frente a cargas externas, por lo que su análisis debe realizarse de manera integrada y no como unidades independientes.

El sistema radical constituye el elemento de anclaje y transferencia de cargas hacia el suelo. Su evaluación se basa en la identificación de indicadores indirectos, como levantamiento de pavimentos, exposición de raíces, inclinación del fuste o alteraciones en el cuello radicular, que permiten inferir la condición del anclaje y su interacción con el suelo.

El fuste actúa como eje estructural y canal de transmisión de esfuerzos entre la copa y el sistema radical. La inspección se orienta a la detección de defectos como cavidades, grietas, deformaciones, exudaciones o discontinuidades que puedan comprometer la sección resistente. La presencia de estos indicadores requiere un

análisis que considere su ubicación, extensión y relación con las zonas de mayor solicitación mecánica.

La copa representa la principal superficie de interacción con el viento y condiciona la generación y distribución de cargas dinámicas. Su evaluación incluye el análisis de la arquitectura, densidad foliar, asimetrías y presencia de ramas codominantes o estructuras débiles. Estas características influyen directamente en la magnitud de las fuerzas transmitidas al fuste y al sistema radical.

El entorno inmediato integra factores externos que afectan la estabilidad del árbol, incluyendo condiciones del suelo, grado de compactación, presencia de infraestructura, drenaje, intervenciones recientes y nivel de exposición asociado al uso del espacio. Estos elementos determinan la interacción árbol–sitio y deben incorporarse en la valoración estructural.

El análisis conjunto de estos cuatro componentes permite construir una visión integral de la estabilidad del árbol, evitando interpretaciones fragmentadas. La integración de la información obtenida constituye la base para la estimación del riesgo y la definición de medidas de manejo proporcionales.

3.2.1 Sistema radical y base del fuste

La inspección del sistema radical se inicia en el cuello radicular y en la zona de transición raíz–fuste, donde se concentran indicadores determinantes para la estabilidad estructural del árbol. La evaluación se orienta a identificar señales de pérdida de anclaje, tales como levantamiento del terreno, fisuración radial del suelo, exposición de raíces estructurales o cambios recientes en la inclinación del eje del fuste. Estos indicadores reflejan alteraciones en la interacción raíz–suelo y pueden asociarse a una reducción de la capacidad de soporte.

En entornos urbanos, la estabilidad del sistema radical se encuentra condicionada por la compactación del suelo, la limitación del volumen edáfico disponible, la impermeabilización superficial y las intervenciones asociadas a infraestructura. El corte de raíces estructurales durante obras civiles constituye

una de las principales causas de debilitamiento del anclaje, al modificar la distribución de cargas y reducir la resistencia del sistema frente a esfuerzos dinámicos. Esta condición puede presentarse aun cuando el árbol conserve una apariencia foliar vigorosa.

La evaluación visual incorpora el análisis de la simetría del sistema radical observable, la presencia de suelo desplazado, deformaciones en el pavimento, daños mecánicos en la base del fuste y evidencias de deterioro basal, como pudriciones o cavidades. Estos elementos deben interpretarse de manera integrada, considerando su relación con la geometría del árbol y las condiciones del sitio.

La zona basal del fuste representa un punto crítico de transferencia de cargas, donde convergen las tensiones generadas por la copa y el sistema radical. La presencia de defectos en esta región, como cavidades o degradación del tejido leñoso, puede reducir significativamente la resistencia estructural y aumentar la susceptibilidad a la falla.

El análisis del sistema radical constituye uno de los componentes más sensibles en la evaluación estructural del arbolado urbano, debido a su papel en el anclaje y la estabilidad global del individuo. Alteraciones en las propiedades del suelo, restricciones espaciales o daños mecánicos pueden comprometer la capacidad de soporte y aumentar la probabilidad de volcamiento.

La interpretación de estos indicadores requiere integrar la información del árbol con las condiciones del entorno inmediato, incluyendo pavimentos, excavaciones recientes y variaciones en el nivel del suelo. Este enfoque permite establecer un diagnóstico más preciso de la estabilidad del individuo y sustentar decisiones de manejo coherentes con el nivel de riesgo identificado.

3.2.2 Fuste y eje estructural

La evaluación del fuste se orienta a la identificación de defectos visibles y de indicios de deterioro interno que puedan comprometer la estabilidad del árbol.

Entre los principales indicadores se incluyen grietas longitudinales, exudaciones, deformaciones anómalas, cavidades externas, heridas abiertas y uniones codominantes con inclusión de corteza. La interpretación de estos elementos debe realizarse en función de su localización, extensión y evolución temporal.

La reducción de la sección transversal resistente constituye un factor determinante en la capacidad del fuste para soportar momentos de flexión inducidos por cargas dinámicas (Niklas, 1992). La relevancia estructural de un defecto no depende únicamente de su presencia, sino de su relación con la geometría del fuste, la distribución de tensiones y el nivel de exposición del individuo.

La inspección técnica debe diferenciar entre configuraciones estructurales estables, adaptaciones compensatorias y alteraciones progresivas asociadas a deterioro activo. Inclinaciones históricamente estabilizadas mediante crecimiento secundario no poseen la misma implicación mecánica que deformaciones recientes, grietas activas o cavidades en expansión. Esta distinción resulta esencial para evitar interpretaciones erróneas y sustentar decisiones proporcionales al riesgo.

El análisis del fuste constituye un componente central del diagnóstico estructural, ya que permite identificar zonas potenciales de debilitamiento que reducen la resistencia del tronco frente a cargas dinámicas. La valoración de cavidades, grietas, deformaciones o heridas debe integrarse con el tamaño del árbol, su arquitectura general y las condiciones del sitio, reconociendo que la estabilidad estructural resulta de la interacción entre múltiples factores biomecánicos (Mattheck & Breloer, 1994; Niklas, 1992).

3.2.3 Arquitectura de copa

La arquitectura de la copa se evalúa a partir de su configuración estructural y de la distribución de la biomasa aérea, variables que determinan la interacción del árbol con el viento y la transmisión de cargas hacia el fuste y el sistema radical. La densidad foliar, la presencia de asimetrías, la existencia de ramas secas de

gran diámetro y la brotación epicórmica asociada a intervenciones previas constituyen indicadores relevantes para la interpretación de su estabilidad.

Las asimetrías en la copa modifican la posición del centro de masa y generan una distribución desigual de cargas, incrementando los momentos de flexión en la base del fuste. Esta condición adquiere mayor relevancia en individuos expuestos, donde la acción del viento actúa de manera directa sobre la superficie proyectada de la copa. La presencia de ramas codominantes con uniones estructuralmente débiles representa puntos críticos de falla, especialmente bajo cargas dinámicas (Mattheck & Breloer, 1994).

La distribución de la biomasa aérea influye en la magnitud y dirección de las fuerzas transmitidas al eje estructural. La acumulación de madera muerta, la presencia de ramas sobreextendidas y las configuraciones desbalanceadas incrementan la probabilidad de ruptura o desprendimiento. La interacción con infraestructura aérea, así como las intervenciones de poda, modifican la forma original de la copa y alteran su comportamiento mecánico.

Como se observa en la Figura 3.1, las podas severas producen una reducción significativa de la estructura original de la copa y favorecen la emisión de brotes epicórmicos. Estos brotes, aunque contribuyen a la recuperación del área foliar, presentan inserciones más débiles y una menor integración estructural con el tejido preexistente. Esta condición modifica la distribución natural de cargas y puede incrementar la susceptibilidad a fallas a mediano y largo plazo.

Figura 3.1

Arquitectura de copa alterada en árbol urbano.



Nota. La reducción significativa de la copa y la presencia de brotes epicórmicos son indicadores frecuentes de podas severas previas que modifican la estructura natural del árbol y pueden afectar su estabilidad biomecánica.

La evaluación de la arquitectura de la copa permite identificar alteraciones estructurales asociadas a intervenciones inadecuadas, desequilibrios en la distribución de biomasa y procesos de degradación en ramas principales. Estas condiciones influyen directamente en la estabilidad mecánica del árbol y en su respuesta frente a cargas dinámicas.

El análisis de la copa debe integrarse con la evaluación del fuste, el sistema radical y las condiciones del sitio, permitiendo construir una valoración

estructural coherente del individuo y sustentar decisiones de manejo acordes con el nivel de riesgo identificado.

3.2.4 Entorno inmediato y nivel de exposición

La evaluación estructural del arbolado urbano incorpora el análisis del entorno inmediato como variable determinante en la estimación del riesgo. La magnitud de las consecuencias asociadas a una posible falla depende directamente del nivel de exposición, definido por la presencia de personas, infraestructura y bienes dentro del área de influencia del árbol.

El nivel de exposición se relaciona con la intensidad de uso del espacio y la proximidad a dianas potenciales, incluyendo tránsito peatonal, circulación vehicular, edificaciones, redes eléctricas, equipamientos urbanos y áreas de permanencia. La frecuencia de ocupación y el valor de los elementos expuestos condicionan la severidad de las consecuencias en caso de falla estructural.

La integración entre la condición estructural del árbol y el nivel de exposición permite establecer prioridades de intervención bajo el principio de proporcionalidad al riesgo, en el que la probabilidad de falla se analiza en conjunto con la magnitud del impacto potencial (Dunster et al., 2017). Este enfoque orienta la asignación de recursos y la definición de medidas de manejo de acuerdo con la criticidad del sitio.

El entorno urbano también influye en el crecimiento y comportamiento estructural del arbolado. La presencia de edificaciones, redes de servicios, señalización, pavimentos y flujo vehicular condiciona la arquitectura del árbol, la distribución de cargas y el desarrollo del sistema radical. Estas interacciones pueden generar conflictos estructurales y operativos que deben ser considerados durante la evaluación técnica.

Las condiciones del suelo y del drenaje constituyen variables adicionales que inciden en la estabilidad. La compactación, la impermeabilización superficial y las alteraciones en la infiltración modifican la interacción raíz–suelo, afectando la

capacidad de anclaje y la respuesta del árbol frente a cargas dinámicas. En regiones tropicales, la saturación periódica del suelo incrementa la susceptibilidad a fallas por volcamiento.

La evaluación del entorno inmediato permite identificar zonas de mayor exposición y establecer criterios de manejo diferenciados según el uso del espacio. Este análisis complementa la valoración estructural del árbol y sustenta decisiones orientadas a la reducción del riesgo sin comprometer la funcionalidad del arbolado como infraestructura verde urbana.

3.3 Clasificación preliminar de condición estructural

La evaluación visual estructurada permite establecer una clasificación preliminar de la condición estructural del arbolado urbano. Esta clasificación no reemplaza las evaluaciones instrumentales cuando resultan necesarias, pero constituye una herramienta operativa para priorizar intervenciones, optimizar recursos y definir programas de monitoreo.

La clasificación se sustenta en la integración de indicadores estructurales observables, el grado de afectación del sistema radical, del fuste y de la copa, el nivel de exposición asociado a la presencia de dianas y la evidencia de estabilidad o progresión de los defectos identificados. Su finalidad es ordenar técnicamente los individuos según su condición observable y su comportamiento potencial frente a cargas dinámicas.

Como se presenta en la Tabla 3.1, la condición estructural puede organizarse en categorías que reflejan distintos niveles de integridad mecánica. Esta estructura permite vincular indicadores observables con acciones de manejo específicas, facilitando decisiones coherentes y proporcionales al riesgo.

Tabla 3.1

Clasificación preliminar de condición estructural del arbolado urbano

Categoría	**Descripción estructural**	**Indicadores observables**	**Acción recomendada**
Condición adecuada	Árbol sin defectos estructurales relevantes. Arquitectura equilibrada y anclaje estable.	Fuste sin grietas ni cavidades significativas; copa balanceada; base sin signos de desplazamiento.	Monitoreo periódico rutinario.
Defectos leves	Presencia de irregularidades menores que no comprometen la estabilidad inmediata.	Ramas secas de pequeño diámetro; ligera asimetría; cicatrices antiguas estables.	Mantenimiento correctivo preventivo.
Defectos moderados	Defectos estructurales que pueden reducir la capacidad resistente, especialmente bajo cargas dinámicas.	Cavidades visibles; codominancia con inclusión de corteza; inclinación progresiva; daños en raíces estructurales.	Evaluación detallada y posible intervención técnica.
Defectos severos	Alteraciones estructurales significativas que comprometen la estabilidad.	Pudrición basal extensa; grietas profundas activas; levantamiento del suelo; pérdida evidente de anclaje.	Evaluación especializada urgente y medidas correctivas inmediatas.

La aplicación de esta clasificación requiere reconocer la naturaleza dinámica del árbol como organismo vivo. La presencia de defectos no implica necesariamente una falla inminente, pero sí una modificación en la capacidad estructural que debe analizarse en función de su localización, extensión y relación con las zonas de mayor solicitación mecánica.

La interpretación distingue entre defectos estabilizados, procesos de deterioro activo y alteraciones inducidas por intervenciones antrópicas. Esta diferenciación permite comprender la evolución del daño y evitar decisiones basadas únicamente en la apariencia externa.

La clasificación preliminar constituye un instrumento técnico para la gestión del arbolado urbano, al facilitar la priorización de intervenciones y la asignación eficiente de recursos. Su aplicación sistemática contribuye a una administración basada en evidencia, orientada a la reducción del riesgo y a la conservación del arbolado como infraestructura verde urbana.

3.4 Exposición, dianas y análisis de consecuencia

La condición estructural del árbol constituye solo uno de los componentes del análisis técnico. En gestión urbana, el riesgo no depende exclusivamente de la probabilidad de falla, sino también del nivel de exposición y de las consecuencias asociadas a un eventual evento estructural. Por ello, la evaluación del arbolado urbano debe integrar el concepto de diana, entendido como el elemento susceptible de ser impactado en caso de caída parcial o total del árbol (Dunster et al., 2017).

La presencia o ausencia de dianas modifica sustancialmente la prioridad de intervención. Un árbol con defectos estructurales moderados ubicado en un área sin tránsito frecuente puede representar menor urgencia que un árbol con defectos similares situado en un entorno de alta circulación peatonal o vehicular.

3.4.1 Identificación de dianas

En el contexto urbano, la identificación de dianas constituye un elemento fundamental dentro de la evaluación del riesgo arbóreo, ya que permite estimar la probabilidad de impacto asociada a una posible falla estructural. Entre las dianas más frecuentes se encuentran los peatones y usuarios del espacio público, los vehículos estacionados o en tránsito, la infraestructura eléctrica y de telecomunicaciones, las edificaciones residenciales o institucionales, así como el equipamiento urbano, incluyendo parques infantiles y mobiliario.

La evaluación no debe limitarse a la simple identificación de la diana, sino que debe incorporar el análisis de su frecuencia de ocupación y el tiempo de permanencia bajo la copa del árbol. Estos factores permiten dimensionar con mayor precisión el nivel de exposición y, en consecuencia, ajustar la clasificación del riesgo de manera más objetiva y coherente con las condiciones reales del entorno urbano.

3.4.2 Nivel de exposición

El nivel de exposición se refiere a la probabilidad de que una diana se encuentre presente dentro del área potencial de impacto en el momento en que ocurre una falla estructural. Este componente resulta fundamental en la evaluación del riesgo, ya que permite dimensionar la probabilidad de afectación en función del uso real del espacio urbano.

De manera preliminar, el nivel de exposición puede diferenciarse en áreas de baja, media y alta intensidad, según la frecuencia de ocupación y la dinámica de uso del entorno. Las zonas de baja exposición corresponden a espacios con tránsito ocasional o restringido, mientras que la exposición media se asocia generalmente a áreas residenciales con circulación intermitente. Por su parte, los niveles de alta exposición se concentran en avenidas principales, centros educativos, hospitales y áreas comerciales, donde la presencia de personas y bienes es constante.

La incorporación de este análisis permite orientar de manera más eficiente la asignación de recursos municipales, priorizando intervenciones en aquellos

individuos cuya condición estructural se combina con altos niveles de exposición. De este modo, la gestión del arbolado urbano se alinea con el principio de proporcionalidad al riesgo, optimizando la toma de decisiones en contextos de alta demanda operativa.

3.4.3 Consecuencia potencial

La consecuencia potencial está determinada por el tamaño del árbol, la parte susceptible de falla —ya sea una rama, el fuste o el individuo completo— y la naturaleza de la diana presente en el área de impacto. Estos factores definen la magnitud del daño que podría generarse en caso de ocurrir una falla estructural.

En términos prácticos, la caída de una rama secundaria en una zona verde abierta puede representar una consecuencia mínima, mientras que la falla del fuste principal sobre una vía de alto tránsito puede generar consecuencias severas, tanto en términos de seguridad pública como de afectación a la infraestructura. Esta diferenciación permite dimensionar el impacto potencial más allá de la simple presencia de un defecto estructural.

La integración entre la condición estructural del árbol y el nivel de exposición del entorno permite establecer criterios técnicos para la priorización de intervenciones, en concordancia con el principio de proporcionalidad al riesgo. Este enfoque facilita una gestión más eficiente, al concentrar los esfuerzos en aquellos casos donde la probabilidad de falla se combina con consecuencias potencialmente significativas.

El análisis del riesgo en entornos urbanos puede representarse de manera simplificada mediante la relación conceptual entre la probabilidad de falla y la magnitud de la consecuencia. Aunque esta aproximación no constituye una formulación matemática estricta en el ámbito de la gestión municipal, proporciona un marco interpretativo útil para orientar la toma de decisiones técnicas y mejorar la consistencia en la evaluación del arbolado urbano.

10.69821/978-628-97750-2-0

3.5 Registro técnico y trazabilidad institucional

La evaluación técnica del arbolado urbano solo adquiere validez operativa cuando se documenta de manera sistemática y verificable. En el ámbito municipal, la ausencia de registros estructurados puede generar inconsistencias en la toma de decisiones, dificultar el seguimiento longitudinal de los individuos y debilitar la defensa técnica ante controversias administrativas o legales.

La trazabilidad institucional implica que cada evaluación debe poder reconstruirse en el tiempo mediante evidencia documental suficiente. Esto incluye no solo la clasificación preliminar de condición estructural, sino también el contexto de exposición, las recomendaciones emitidas y las acciones ejecutadas.

3.5.1 Fichas técnicas de evaluación

El instrumento básico de registro en la evaluación del arbolado urbano es la ficha técnica estandarizada, la cual constituye una herramienta fundamental para documentar de manera sistemática la información obtenida en campo. Su uso permite organizar los datos de forma estructurada y facilitar su análisis dentro de los procesos de gestión municipal.

La ficha debe incluir, como mínimo, la identificación del sitio —incorporando distrito, corregimiento y coordenadas geográficas—, la especie cuando sea posible su determinación, las dimensiones aproximadas del árbol, tales como altura y diámetro a la altura del pecho, así como la condición estructural del individuo de acuerdo con la clasificación establecida previamente. Asimismo, debe contemplar el nivel de exposición, la presencia de dianas potenciales, la recomendación técnica derivada de la evaluación y los datos correspondientes a la fecha y al responsable de la inspección.

La estandarización de estos formatos permite homogeneizar los criterios entre diferentes equipos evaluadores, reducir la variabilidad en la interpretación técnica y garantizar la coherencia institucional en la toma de decisiones. De esta manera, la ficha técnica se consolida no solo como un instrumento de registro, sino como

un componente clave dentro del sistema de trazabilidad y gestión sostenible del arbolado urbano.

3.5.2 Evidencia fotográfica y georreferenciación

La incorporación de evidencia fotográfica constituye un componente esencial dentro de los sistemas de trazabilidad del arbolado urbano, ya que permite respaldar de manera objetiva las observaciones realizadas durante la evaluación. El registro visual debe documentar tanto la vista general del árbol como los detalles de los defectos estructurales relevantes, además del contexto urbano inmediato y la presencia de posibles dianas, con el fin de ofrecer una interpretación integral de la condición del individuo.

La georreferenciación, mediante el uso de coordenadas UTM o sistemas de posicionamiento global (GPS), permite vincular cada registro a una ubicación precisa dentro del territorio. Esta información facilita su integración en sistemas de información geográfica, lo que a su vez posibilita la realización de análisis espaciales, la planificación estratégica de intervenciones y la priorización de acciones en zonas críticas.

La combinación de evidencia fotográfica y georreferenciación fortalece la calidad del registro técnico, mejora la trazabilidad de las evaluaciones y contribuye a una gestión más eficiente, transparente y basada en evidencia del arbolado urbano.

3.5.3 Seguimiento y monitoreo

La gestión del arbolado urbano no se limita a evaluaciones puntuales. Los árboles clasificados con defectos leves o moderados pueden requerir monitoreo periódico, especialmente en ciudades tropicales con marcada estacionalidad de lluvias.

El seguimiento sistemático permite detectar cambios progresivos en inclinación, desarrollo de cavidades o alteraciones en la arquitectura de copa, fortaleciendo el enfoque preventivo frente al correctivo.

3.5.4 Responsabilidad técnica e institucional

La evaluación del arbolado urbano constituye una actividad que implica responsabilidad técnica y administrativa, ya que las decisiones derivadas de este proceso pueden influir directamente en la seguridad pública, la conservación del patrimonio arbóreo y la gestión del espacio urbano. En este sentido, la valoración estructural de los árboles debe realizarse siguiendo criterios metodológicos claros, sustentados en principios científicos y documentados mediante registros verificables.

Desde la perspectiva profesional, el evaluador debe interpretar los indicadores estructurales del árbol considerando su contexto biológico, biomecánico y ambiental. La toma de decisiones relacionadas con poda estructural, reducción de copa, estabilización o remoción del individuo no debe basarse únicamente en percepciones subjetivas o presiones externas, sino en diagnósticos técnicos que integren la condición estructural del árbol, el nivel de exposición urbana y la probabilidad de consecuencias asociadas a una eventual falla. La utilización de metodologías reconocidas internacionalmente, como los protocolos de evaluación de riesgo promovidos por la International Society of Arboriculture (ISA), contribuye a estandarizar criterios técnicos y a reducir la variabilidad interpretativa entre evaluadores (Dunster et al., 2017).

Desde el punto de vista institucional, la administración municipal tiene la responsabilidad de garantizar que las decisiones sobre el manejo del arbolado urbano se adopten dentro de un marco técnico, transparente y documentado. La existencia de registros sistemáticos de evaluación, fichas técnicas, evidencia fotográfica y georreferenciación permite respaldar las acciones ejecutadas por las autoridades responsables de la gestión del arbolado, así como facilitar el seguimiento de los individuos evaluados a lo largo del tiempo.

En el caso de la Ciudad de Panamá, la gestión del arbolado urbano se enmarca dentro de las competencias municipales relacionadas con la administración de los espacios públicos y la conservación de los recursos forestales urbanos. En este

contexto, la aplicación de evaluaciones técnicas documentadas contribuye a fortalecer la gobernanza del arbolado urbano y a respaldar las decisiones institucionales orientadas al manejo, mantenimiento y conservación del patrimonio arbóreo del distrito (Municipio de Panamá, 2016).

En consecuencia, la responsabilidad técnica e institucional en la evaluación del arbolado urbano no se limita a la inspección visual del árbol, sino que implica la aplicación de criterios profesionales consistentes, la documentación sistemática de los diagnósticos y la adopción de decisiones proporcionales al nivel de riesgo identificado. Este enfoque permite integrar la conservación del arbolado con la seguridad urbana, promoviendo una gestión municipal más objetiva, transparente y basada en evidencia.

3.5.5 Consideraciones legales y administrativas en la gestión del arbolado urbano

La gestión del arbolado urbano se desarrolla dentro de un marco institucional y normativo que regula las intervenciones sobre los árboles ubicados en espacios públicos y privados dentro del ámbito urbano. En este contexto, las decisiones relacionadas con poda, mantenimiento, reducción estructural o remoción de árboles no constituyen únicamente acciones técnicas, sino también actuaciones administrativas que deben ajustarse a las disposiciones legales vigentes.

En muchas ciudades, el arbolado urbano es considerado parte del patrimonio ambiental y paisajístico del municipio, por lo que su manejo se encuentra sujeto a regulaciones específicas destinadas a garantizar su conservación y a evitar intervenciones indiscriminadas. Estas normativas suelen establecer procedimientos para la autorización de podas, tala o trasplante de árboles, así como responsabilidades institucionales en materia de mantenimiento, monitoreo y protección del arbolado urbano.

En el caso de la Ciudad de Panamá, la gestión del arbolado público forma parte de las competencias municipales relacionadas con la administración de los espacios públicos y la protección de los recursos forestales urbanos. El Acuerdo Municipal No. 91 de 19 de abril de 2016, que establece disposiciones sobre el manejo de los

recursos forestales en el distrito de Panamá, reconoce la importancia del arbolado urbano y establece criterios para su protección, conservación y manejo técnico (Municipio de Panamá, 2016).

Desde la perspectiva administrativa, la documentación técnica derivada de las evaluaciones del arbolado constituye un elemento fundamental para respaldar las decisiones institucionales. Informes técnicos, fichas de evaluación, registros fotográficos y localización geográfica permiten justificar intervenciones ante eventuales reclamaciones ciudadanas, auditorías institucionales o procesos administrativos relacionados con el manejo del arbolado.

Asimismo, la gestión municipal del arbolado urbano debe equilibrar dos objetivos fundamentales: la conservación del patrimonio arbóreo y la garantía de la seguridad pública. En situaciones donde se identifican árboles con defectos estructurales severos o riesgo elevado de falla, las autoridades competentes deben adoptar medidas preventivas basadas en criterios técnicos verificables. La documentación adecuada del proceso de evaluación permite demostrar que las decisiones adoptadas responden a diagnósticos profesionales y no a criterios arbitrarios.

En este sentido, la integración entre evaluación técnica, registro documental y cumplimiento del marco normativo fortalece la gobernanza del arbolado urbano. La existencia de procedimientos claros y de respaldo técnico contribuye a mejorar la transparencia institucional, reducir conflictos con la ciudadanía y promover una gestión responsable del patrimonio arbóreo urbano.

3.6 Toma de decisiones y acciones de manejo

La toma de decisiones en la gestión del arbolado urbano se fundamenta en la integración de la evaluación estructural, el análisis de exposición y la clasificación del riesgo. Este proceso permite definir acciones de manejo proporcionales, técnicamente justificadas y orientadas a la reducción del riesgo sin comprometer la funcionalidad del arbolado como infraestructura verde (Dunster et al., 2017; Smiley et al., 2017).

Las decisiones deben basarse en la relación entre probabilidad de falla y consecuencia potencial, evitando intervenciones generalizadas o respuestas reactivas sin sustento técnico. La interpretación adecuada de los indicadores estructurales y del entorno permite seleccionar medidas ajustadas a la condición específica de cada individuo.

Las acciones de manejo pueden agruparse en cuatro categorías principales: monitoreo, mantenimiento correctivo, intervención estructural y remoción. La selección de cada medida depende del nivel de riesgo, la evolución de los defectos y las condiciones del sitio.

El monitoreo se aplica a individuos con condición estructural estable o con defectos leves, permitiendo evaluar su evolución en el tiempo mediante inspecciones periódicas. El mantenimiento correctivo incluye intervenciones como poda sanitaria, eliminación de ramas muertas o reducción selectiva de carga, orientadas a mejorar la estabilidad sin alterar significativamente la arquitectura del árbol.

Las intervenciones estructurales comprenden acciones dirigidas a modificar la distribución de cargas o mitigar defectos específicos, incluyendo reducción de copa, estabilización de ramas y manejo de codominancias. Estas medidas requieren criterios técnicos precisos para evitar efectos adversos derivados de intervenciones inadecuadas.

10.69821/978-628-97750-2-0

La remoción se justifica únicamente en situaciones donde el nivel de riesgo es alto o extremo y no existen alternativas viables de mitigación. Esta decisión debe sustentarse en evidencia técnica documentada, considerando tanto la condición estructural del árbol como el nivel de exposición y la severidad de las consecuencias potenciales.

La planificación de las intervenciones debe incorporar la estacionalidad climática, especialmente en regiones tropicales donde los periodos de lluvias intensas incrementan la probabilidad de falla. La priorización de acciones antes de la temporada lluviosa contribuye a la reducción del riesgo asociado a eventos extremos.

La toma de decisiones no debe limitarse al individuo evaluado, sino integrarse dentro de una estrategia de gestión del arbolado urbano a escala de paisaje. La planificación preventiva, la selección adecuada de especies y el diseño del espacio urbano constituyen elementos clave para reducir la recurrencia de conflictos estructurales.

La documentación de cada intervención permite dar seguimiento a la evolución del árbol, evaluar la efectividad de las medidas aplicadas y fortalecer la trazabilidad institucional. Este proceso consolida un modelo de gestión basado en evidencia técnica, orientado a la seguridad pública y a la conservación del arbolado urbano.

10.69821/978-628-97750-2-0

CAPÍTULO IV

GESTIÓN E INTERVENCIÓN DEL ARBOLADO URBANO BASADAS EN EVALUACIÓN DE RIESGO Y PRINCIPIOS BIOMECÁNICOS

La gestión del arbolado urbano representa el punto donde el conocimiento técnico se convierte en acción. A partir de la evaluación estructural y del análisis de riesgo, las decisiones de manejo se materializan en intervenciones orientadas a garantizar la seguridad, conservar la funcionalidad del árbol y mantener su aporte dentro del sistema urbano.

Intervenir un árbol no implica únicamente ejecutar una poda o una remoción. Cada acción modifica su equilibrio biológico y su comportamiento estructural. Por esta razón, las decisiones deben sustentarse en la comprensión de los procesos fisiológicos y biomecánicos que gobiernan su crecimiento y su respuesta frente a cargas externas. La arboricultura moderna reconoce que el árbol no es un elemento pasivo, sino un organismo capaz de adaptarse, compensar tensiones y reorganizar su estructura en función de las condiciones del entorno (Shigo, 1984; Gilman, 2011).

Las prácticas empíricas o basadas únicamente en la percepción del riesgo tienden a generar intervenciones desproporcionadas, que pueden comprometer la estabilidad del árbol a mediano plazo. En contraste, un enfoque técnico permite seleccionar medidas ajustadas a la condición real del individuo, evitando tanto la sobreintervención como la omisión de acciones necesarias.

La gestión adecuada del arbolado urbano exige equilibrar dos dimensiones que con frecuencia se perciben como opuestas: la seguridad pública y la conservación de los servicios ecosistémicos. Los árboles regulan la temperatura, mejoran la calidad del aire, capturan carbono y contribuyen al bienestar urbano. Su eliminación innecesaria representa una pérdida funcional para la ciudad,

mientras que la falta de intervención en individuos inestables puede generar riesgos significativos.

Este capítulo desarrolla los principios y criterios que orientan la intervención del arbolado urbano desde una perspectiva técnica y proporcional al riesgo. Se abordan las principales acciones de manejo, sus fundamentos biológicos y biomecánicos, así como los criterios que permiten seleccionar la medida más adecuada en función de la condición estructural del árbol y su nivel de exposición.

4.1 Marco institucional y regulatorio de la gestión del arbolado urbano en Panamá

La gestión del arbolado urbano en la Ciudad de Panamá se desarrolla dentro de un marco institucional donde convergen responsabilidades municipales y regulaciones ambientales de alcance nacional. Aunque no existe una ley municipal exclusiva para el arbolado urbano, el Municipio de Panamá, a través de su Dirección de Gestión Ambiental, ha establecido programas técnicos que orientan la arborización, el mantenimiento y la intervención en espacios públicos.

Este enfoque responde a la necesidad de integrar los árboles dentro de la planificación urbana, reconociéndolos como parte de la infraestructura verde que influye en la seguridad, la calidad ambiental y la resiliencia de la ciudad (FAO, 2016; Livesley et al., 2016; Dunster et al., 2017).

Los árboles ubicados en vías públicas, parques y áreas verdes forman parte del patrimonio natural administrado por el municipio. Sin embargo, esta responsabilidad no implica una autonomía total en la toma de decisiones. Debido a su condición biológica y su valor ambiental, el arbolado también está sujeto a la normativa nacional que regula su manejo y protección. Esto implica que las intervenciones deben sustentarse en criterios técnicos claros y en procesos administrativos que respalden cada decisión, especialmente cuando se trata de podas severas o talas.

De acuerdo con la Resolución N.° DM-0055-2020 del Ministerio de Ambiente, las actividades de poda y tala requieren autorización previa. Este requisito no solo actúa como un mecanismo de control, sino que también asegura que las intervenciones estén justificadas desde el punto de vista técnico y ambiental. En la práctica, esto significa que cualquier intervención relevante debe basarse en una evaluación documentada y, cuando corresponda, tramitar el permiso ante MiAmbiente, garantizando que la decisión pueda ser explicada y sustentada institucionalmente.

La interacción entre el municipio y la autoridad ambiental configura un modelo de gestión que exige coordinación constante. Lejos de representar una limitación, esta articulación fortalece la calidad de las decisiones, ya que obliga a respaldarlas con criterios técnicos verificables. Esto resulta especialmente importante en situaciones donde existen conflictos ciudadanos o cuando ocurren fallas estructurales con impacto en la seguridad pública.

Incorporar el marco institucional dentro del proceso técnico permite que las intervenciones sean más consistentes y transparentes. La documentación de la evaluación, junto con el respaldo normativo, deja evidencia clara de qué se observó, cómo se interpretó y qué decisión se tomó. Este enfoque refuerza la trazabilidad de la gestión y fortalece la legitimidad de las acciones ejecutadas.

En este sentido, la coordinación entre el Municipio de Panamá y el Ministerio de Ambiente constituye un elemento clave para asegurar que el manejo del arbolado urbano se realice con responsabilidad ambiental, coherencia técnica y respaldo jurídico, consolidando al árbol como una infraestructura viva cuyo manejo requiere criterios profesionales y decisiones bien fundamentadas.

4.2 Principios generales de intervención

Las intervenciones en el arbolado urbano deben partir siempre de una evaluación técnica previa y del entendimiento del árbol como un organismo vivo, dinámico y adaptable. A diferencia de las estructuras artificiales, cuya respuesta puede predecirse con relativa precisión, los árboles reaccionan de forma variable según

la especie, su estado fisiológico, las condiciones del suelo y su historia de manejo. Por esta razón, cada intervención requiere una lectura cuidadosa del individuo y del sitio, evitando decisiones generalizadas o basadas únicamente en criterios estéticos (Niklas, 1992).

El manejo urbano exige interpretar al árbol como un sistema integrado donde raíces, fuste y copa funcionan de manera interdependiente. Cualquier intervención sobre uno de estos componentes genera efectos sobre el resto del sistema, lo que hace necesario considerar no solo el defecto observado, sino su relación con la estabilidad global del árbol y con el entorno donde se encuentra.

Uno de los principios centrales es la proporcionalidad al riesgo. El objetivo de la gestión no es eliminar completamente la posibilidad de falla —lo cual no es viable en organismos vivos expuestos a condiciones ambientales variables— sino reducir el riesgo a niveles aceptables mediante decisiones técnicas. La presencia de un defecto no implica necesariamente un peligro inmediato; su interpretación debe considerar simultáneamente la probabilidad de falla y las posibles consecuencias, especialmente en función de la presencia de dianas y del uso del espacio (Dunster et al., 2017).

La consistencia en la evaluación es otro aspecto fundamental. Diferencias en la interpretación entre evaluadores pueden generar decisiones contradictorias y debilitar la gestión institucional. Por ello, el uso de metodologías estandarizadas y la formación técnica especializada permiten reducir la subjetividad, mejorar la trazabilidad y fortalecer la calidad de las decisiones (Koeser et al., 2020).

Desde la perspectiva biomecánica, la estabilidad del árbol depende de la interacción entre la calidad de la madera, la forma del individuo y las condiciones del sitio. La copa, por ejemplo, no solo cumple funciones fisiológicas, sino que también regula la forma en que el árbol interactúa con el viento. Intervenciones drásticas pueden alterar este equilibrio, provocar respuestas compensatorias como brotación epicórmica y generar estructuras más débiles a mediano plazo (Peltola, 2006; Gilman, 2012).

El principio de mínima intervención resulta clave en este contexto. Los árboles poseen mecanismos naturales de defensa que les permiten aislar el daño, como lo describe el modelo CODIT. Cada corte genera una herida, y cuando estas intervenciones son innecesarias o excesivas, pueden superar la capacidad de defensa del árbol y acelerar procesos de deterioro interno (Shigo, 1984). Por ello, intervenir menos, pero mejor, constituye un criterio fundamental en la arboricultura moderna.

Las decisiones deben apoyarse en evidencia observable y documentada, evitando respuestas impulsadas por percepciones de peligro o presiones externas. La gestión del arbolado urbano requiere criterios técnicos consistentes que permitan justificar cada intervención dentro de un marco profesional y verificable (Dunster et al., 2017).

En ciudades tropicales como Panamá, las condiciones climáticas introducen un factor adicional. Durante la temporada de lluvias, la saturación del suelo reduce temporalmente la estabilidad del sistema radical, aumentando la susceptibilidad al volcamiento. Esta situación exige ajustar la programación de intervenciones y priorizar inspecciones en periodos críticos, incorporando la variabilidad climática como parte del análisis técnico (Peltola, 2006).

En conjunto, estos principios establecen que el manejo del arbolado urbano debe ser proporcional, técnicamente fundamentado, mínimamente invasivo y adaptado a las condiciones del entorno. Este enfoque permite intervenir de manera más precisa, reducir riesgos y conservar la funcionalidad del árbol dentro del sistema urbano.

4.3 Poda: fundamentos técnicos y criterios de aplicación

La poda es la intervención más frecuente en el manejo del arbolado urbano y, al mismo tiempo, una de las prácticas con mayor impacto cuando se realiza sin criterios técnicos. Cada corte genera una herida que interrumpe la continuidad vascular y expone tejidos internos, por lo que no puede considerarse un procedimiento rutinario ni meramente estético. Además de sus efectos biológicos,

la poda modifica la distribución de masa, la rigidez de la copa y la forma en que el árbol responde a las cargas externas, lo que implica cambios directos en su comportamiento estructural (Shigo, 1984; Niklas, 1992).

La respuesta del árbol depende de la especie, la edad, el vigor, la disponibilidad hídrica y el tamaño de la rama removida. Los cortes de gran diámetro incrementan la superficie expuesta y pueden superar la capacidad de compartimentación, favoreciendo la entrada de agentes degradadores y el desarrollo de pudriciones internas, especialmente cuando el árbol presenta condiciones de estrés o el corte se realiza fuera de la zona adecuada (Shigo, 1984; Gilman, 2012). Por esta razón, la localización del corte, su diámetro y la secuencia de ejecución son determinantes para la respuesta del árbol y su estabilidad futura.

Desde el punto de vista biomecánico, la poda altera la distribución de cargas en el sistema raíz–fuste–copa. La copa actúa como una superficie de interacción con el viento y como un sistema de amortiguación dinámica. Su reducción modifica el centro de masa y el momento de flexión que actúa sobre la base del árbol. Una intervención selectiva puede disminuir tensiones en puntos críticos; sin embargo, reducciones severas tienden a provocar brotación epicórmica vigorosa, cuyas inserciones presentan menor calidad estructural que las ramas originales, incrementando la vulnerabilidad a mediano plazo (James et al., 2006; Gilman, 2012).

La poda debe responder a objetivos claros definidos a partir de la evaluación técnica. Entre los más relevantes se encuentran la eliminación de ramas muertas o defectuosas, la reducción de interferencias con infraestructura, la mejora de la estructura de la copa en etapas tempranas y la disminución de cargas en individuos con defectos específicos. La ausencia de objetivos definidos conduce a intervenciones innecesarias que pueden afectar tanto la estabilidad como la funcionalidad del árbol.

10.69821/978-628-97750-2-0

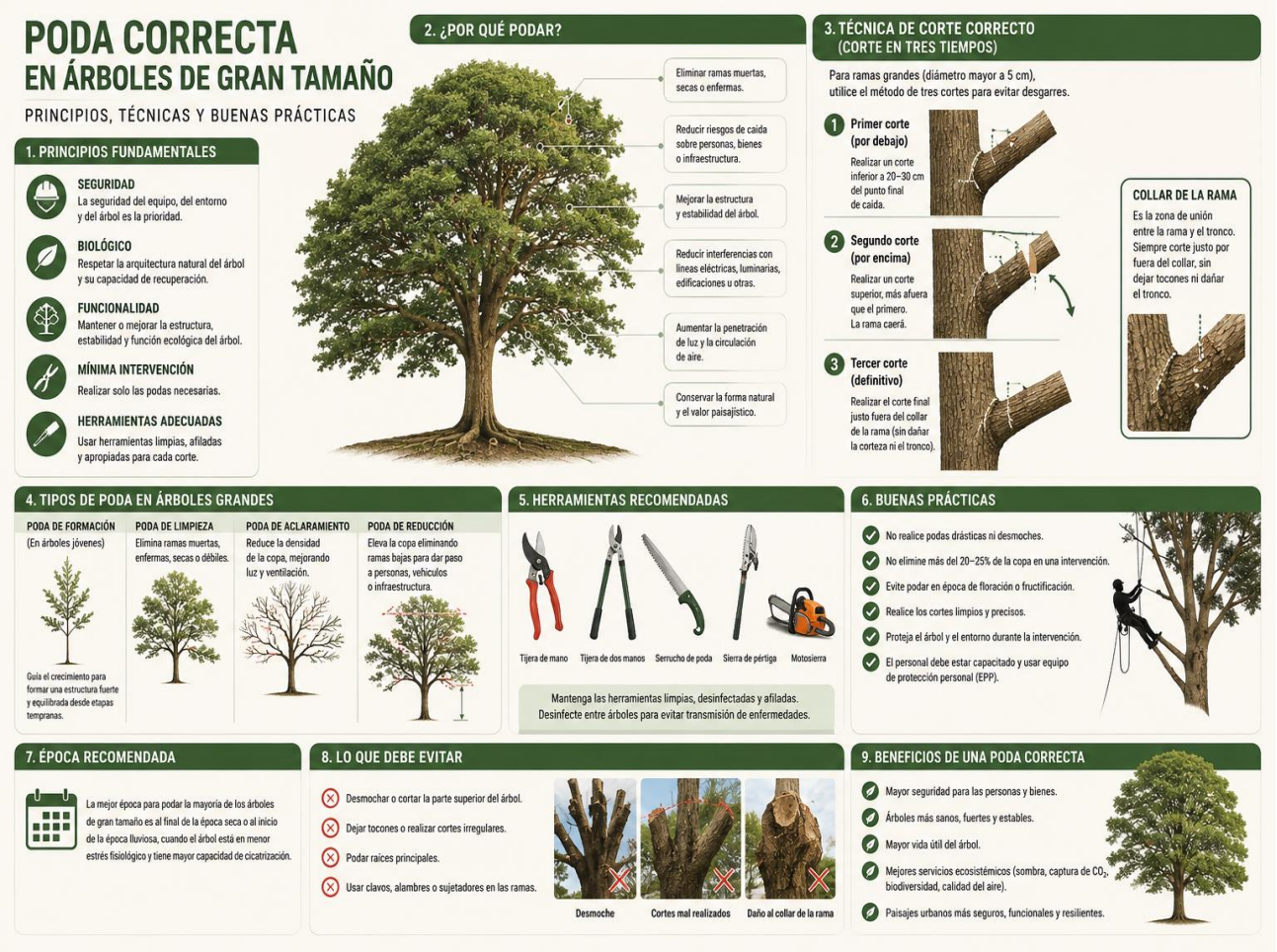
El principio de mínima intervención resulta fundamental. Reducir únicamente lo necesario permite mantener la integridad fisiológica y estructural del individuo, evitando respuestas compensatorias que puedan generar nuevas debilidades. En este sentido, la poda no debe interpretarse como una solución universal, sino como una herramienta que requiere precisión técnica y criterio profesional.

La ejecución adecuada incluye el uso de técnicas correctas de corte, respetando el collar de la rama y evitando desgarros que amplíen la superficie de daño. Asimismo, debe considerarse la temporalidad de la intervención, ya que periodos de estrés hídrico o condiciones climáticas adversas pueden afectar la capacidad de recuperación del árbol.

La poda forma una intervención que debe aplicarse con criterio, basada en diagnóstico previo, objetivos definidos y comprensión del comportamiento biológico y estructural del árbol (ver figura 4.4). Su correcta ejecución permite reducir riesgos y mantener la funcionalidad del arbolado urbano, mientras que su aplicación inadecuada puede generar efectos contrarios a los buscados.

Figura 4.4.

Principios técnicos para la poda estructural de árboles urbanos de gran tamaño: fundamentos, tipos de intervención, método de corte y buenas prácticas.



Nota. La figura sintetiza criterios técnicos relacionados con objetivos de poda, método de corte en tres tiempos, herramientas, buenas prácticas y errores que deben evitarse durante intervenciones en árboles urbanos de gran tamaño. Elaboración propia con fines didácticos.

4.3.1 Fundamentos fisiológicos y biomecánicos de la poda

La poda modifica de manera directa la arquitectura del árbol y, con ello, su funcionamiento interno y su comportamiento estructural. Cada corte interrumpe la continuidad vascular, expone tejidos y activa mecanismos de defensa. A diferencia de una estructura inerte, el árbol no restaura el tejido dañado, sino que

lo aísla mediante procesos de compartimentación, tal como lo describe el modelo CODIT. La eficacia de este proceso depende de la especie, el estado de vigor, el tamaño del corte y la frecuencia de las intervenciones. Cuando las podas son extensas o reiteradas, pueden superar la capacidad defensiva del árbol y favorecer el desarrollo de deterioro interno (Shigo, 1984).

Desde el punto de vista fisiológico, la poda altera la relación entre producción y demanda de energía dentro del árbol. La reducción de área foliar disminuye la capacidad fotosintética y modifica el equilibrio entre órganos productores y consumidores de recursos. Esta alteración puede afectar el crecimiento, la capacidad de respuesta frente al estrés y la disponibilidad de reservas, especialmente en individuos debilitados o sometidos a condiciones ambientales adversas.

En términos biomecánicos, el árbol funciona como una estructura flexible cuya estabilidad depende de la interacción entre la calidad del material leñoso, la forma del individuo y las condiciones del sitio. La poda redistribuye la biomasa y modifica la forma en que se transmiten las cargas desde la copa hacia el fuste y el sistema radical. Una intervención bien dirigida puede reducir tensiones en zonas críticas; sin embargo, una reducción excesiva puede alterar la arquitectura natural, disminuir la resistencia estructural y afectar la capacidad del árbol para disipar energía bajo la acción del viento (Niklas, 1992; Peltola, 2006).

La copa cumple un papel clave en la interacción con las cargas aerodinámicas. Su estructura permite al árbol oscilar y redistribuir tensiones, funcionando como un sistema de amortiguación natural. Cuando la poda elimina una proporción significativa de esta estructura, se generan respuestas compensatorias, como la brotación epicórmica. Estas nuevas ramas suelen presentar inserciones más débiles, lo que puede incrementar la vulnerabilidad estructural en el mediano plazo.

En regiones tropicales, estas consideraciones adquieren mayor relevancia. La combinación de vientos intensos, lluvias torrenciales y suelos temporalmente

saturados modifica las condiciones de estabilidad, por lo que la poda debe planificarse considerando tanto la estructura del árbol como las características del sitio. La intervención sin esta lectura integrada puede generar desequilibrios que aumenten la susceptibilidad a fallas estructurales.

En conjunto, los fundamentos fisiológicos y biomecánicos de la poda establecen que cada intervención debe ser precisa, limitada a lo necesario y basada en el entendimiento del árbol como un sistema vivo. Este enfoque permite reducir riesgos sin comprometer la estabilidad ni la funcionalidad del arbolado urbano.

4.3.2 Objetivos técnicos de la poda

En la gestión del arbolado urbano, la poda debe responder a objetivos técnicos claramente definidos y sustentados en la evaluación previa del árbol y de su entorno. No se trata de una práctica rutinaria, sino de una intervención dirigida a resolver condiciones específicas que afectan la estabilidad, la funcionalidad o la interacción del árbol con el espacio urbano.

Entre los objetivos más relevantes se encuentra la eliminación de ramas muertas, debilitadas o con probabilidad de falla, especialmente cuando su tamaño o ubicación representan un riesgo potencial. Asimismo, la corrección temprana de defectos estructurales, como uniones codominantes con inclusión de corteza, permite reducir la probabilidad de fallas futuras al mejorar la distribución de cargas dentro de la copa.

Otro objetivo frecuente corresponde a la compatibilidad con infraestructura urbana. En estos casos, la poda busca reducir interferencias con redes eléctricas, edificaciones o señalización, siempre que no existan alternativas de diseño o reubicación. Este tipo de intervención requiere un alto nivel de precisión, ya que soluciones generalizadas o reducciones excesivas pueden generar desequilibrios estructurales y respuestas compensatorias indeseadas.

La poda también cumple una función preventiva a través de la formación temprana de la arquitectura del árbol. Durante las primeras etapas de desarrollo,

es posible orientar el crecimiento hacia estructuras más estables, promoviendo un eje dominante definido y una adecuada distribución de ramas. Esta estrategia reduce la aparición de defectos estructurales y disminuye la necesidad de intervenciones correctivas en etapas posteriores.

El enfoque preventivo resulta más eficiente que la corrección tardía, ya que evita la realización de cortes de gran diámetro, conserva la capacidad fisiológica del árbol y reduce la probabilidad de deterioro interno asociado a heridas extensas (Shigo, 1984; Gilman, 2012). En términos de gestión urbana, este principio permite optimizar recursos, disminuir riesgos y mejorar la calidad estructural del arbolado a largo plazo.

Cada objetivo debe evaluarse en función del diagnóstico técnico y del nivel de exposición del entorno. La validez del objetivo no justifica intervenciones severas ni reducciones generalizadas de copa. La poda debe ser selectiva, precisa y coherente con la condición del árbol, evitando alteraciones innecesarias que comprometan su estabilidad o su funcionalidad dentro del sistema urbano (Dunster et al., 2017).

En conjunto, los objetivos técnicos de la poda orientan la intervención hacia acciones justificadas, proporcionales y basadas en el comportamiento real del árbol. Este enfoque permite mantener el equilibrio entre la reducción del riesgo y la conservación de los beneficios que el arbolado aporta a la ciudad.

4.3.3 Tipos de poda y criterios de aplicación

La poda en arbolado urbano no responde a un único objetivo ni a una única técnica. Su correcta aplicación requiere diferenciar tipos de intervención según la condición del árbol, su etapa de desarrollo y su interacción con el entorno urbano. La clasificación de los tipos de poda permite estandarizar criterios, mejorar la consistencia técnica y evitar intervenciones generalizadas que puedan comprometer la estabilidad o funcionalidad del árbol.

4.3.3.1 Poda de formación

La poda de formación se aplica en etapas tempranas del desarrollo del árbol y tiene como objetivo orientar su arquitectura estructural. Se enfoca en promover un eje dominante, eliminar codominancias incipientes y distribuir adecuadamente las ramas principales.

Este tipo de intervención permite prevenir defectos estructurales futuros, reducir la necesidad de cortes de gran diámetro en etapas adultas y mejorar la estabilidad mecánica del individuo. Su aplicación temprana representa una de las estrategias más eficientes en la gestión urbana, al disminuir costos y riesgos a largo plazo (Gilman, 2012).

4.3.3.2 Poda sanitaria

La poda sanitaria se orienta a la eliminación de ramas muertas, dañadas, enfermas o con deterioro estructural evidente. Su objetivo principal es reducir la probabilidad de falla asociada a material degradado y limitar posibles focos de propagación de patógenos.

Esta intervención debe ser selectiva y enfocarse en tejido comprometido, evitando cortes innecesarios en estructuras sanas. Su aplicación es especialmente relevante en árboles maduros o en individuos sometidos a estrés ambiental**.**

4.3.3.3 Poda de reducción estructural

La poda de reducción estructural se aplica cuando existe evidencia de sobrecarga, conflictos con infraestructura o defectos localizados que incrementan la probabilidad de falla. Su objetivo es disminuir tensiones mecánicas en puntos críticos sin alterar de manera significativa la arquitectura natural del árbol.

La reducción debe ejecutarse con criterios de selectividad y moderación, enfocándose en ramas específicas y no como una práctica generalizada de rebaja de copa. Reducciones excesivas pueden comprometer la capacidad fotosintética, alterar el balance energético y generar estrés fisiológico, especialmente cuando se elimina una proporción elevada de área foliar en un solo evento.

Estas intervenciones pueden inducir brotación epicórmica vigorosa, cuyas inserciones presentan menor calidad estructural, aumentando la vulnerabilidad futura (Gilman, 2012; Nowak et al., 2014). Por esta razón, la reducción debe basarse en evidencia técnica clara y mantenerse dentro de límites que conserven la funcionalidad del árbol.

Desde el análisis de riesgo, la reducción estructural debe ser proporcional al nivel de exposición. Su aplicación indiscriminada como medida preventiva carece de fundamento técnico y puede generar efectos contrarios a los esperados, al incrementar heridas, debilitar la estructura y reducir la consistencia del manejo municipal (Dunster et al., 2017).

Además, estudios recientes muestran que la intensidad de la poda influye en los servicios ecosistémicos urbanos, particularmente en la regulación térmica y la captura de contaminantes. Reducciones severas pueden disminuir temporalmente estos beneficios, lo que refuerza la necesidad de intervenciones moderadas y estratégicamente planificadas (Rahman et al., 2020).

4.3.3.4 Poda de elevación

La poda de elevación consiste en la remoción de ramas bajas para permitir el tránsito peatonal o vehicular, mejorar la visibilidad o evitar interferencias con infraestructura.

Debe aplicarse de manera progresiva, evitando eliminar un volumen excesivo de la copa inferior en un solo evento, ya que esto puede alterar la distribución de cargas y afectar la estabilidad del árbol.

4.3.3.5 Poda de restauración

La poda de restauración se aplica en árboles que han sido sometidos a podas severas o inadecuadas. Su objetivo es reconfigurar la estructura de la copa, seleccionar brotes más estables y mejorar progresivamente la arquitectura del árbol.

Este proceso requiere seguimiento en el tiempo y criterios técnicos precisos, ya que busca corregir alteraciones previas sin generar nuevas debilidades estructurales.

4.3.4 Prácticas inadecuadas y consecuencias

El descope o *topping* es una de las prácticas más perjudiciales en el manejo del arbolado urbano. La remoción drástica de la parte superior del árbol elimina su arquitectura natural, reduce de forma abrupta la capacidad fotosintética y genera heridas extensas. Estas condiciones superan con frecuencia la capacidad de defensa del árbol, limitando los procesos de compartimentación descritos en el modelo CODIT (Shigo, 1984).

Como respuesta, el árbol emite brotes epicórmicos vigorosos que pueden dar la impresión de recuperación. Sin embargo, estas nuevas estructuras suelen desarrollarse con inserciones más débiles que las ramas originales, lo que incrementa la probabilidad de fractura bajo cargas dinámicas (Gilman, 2012). En ciudades tropicales, donde las lluvias intensas y las ráfagas de viento son frecuentes, este tipo de respuesta se manifiesta con mayor rapidez debido al crecimiento acelerado y al aumento de biomasa en estructuras de baja calidad mecánica.

Desde la biomecánica, la estabilidad del árbol no depende únicamente del tamaño de la copa, sino del equilibrio entre la masa aérea, la resistencia del material leñoso y la capacidad de anclaje del sistema radical. Una reducción excesiva, realizada sin considerar estas variables, puede alterar ese equilibrio y generar nuevas condiciones de inestabilidad. Este efecto es más evidente en entornos urbanos donde el sistema radical se encuentra limitado por compactación del suelo, pavimentos o intervenciones previas que han afectado las raíces estructurales (Niklas, 1992; Peltola, 2006).

Un ejemplo de intervención severa que altera significativamente la arquitectura del árbol se presenta en la Figura 4.2.

10.69821/978-628-97750-2-0

Figura 4.2

Poda severa o descope en árbol urbano.



Nota. La remoción drástica de la copa altera la arquitectura natural del árbol, reduce su capacidad fotosintética y favorece la formación de brotes epicórmicos con inserciones estructuralmente más débiles.

En la práctica municipal, esto implica diferenciar entre una reducción selectiva, basada en evidencia técnica, y una reducción indiscriminada motivada por percepciones de riesgo o presión social. La primera busca corregir condiciones específicas; la segunda tiende a generar daños acumulativos que comprometen la estabilidad y reducen la vida útil del árbol.

La poda inadecuada no solo afecta al individuo intervenido, sino que debilita la consistencia del manejo urbano. Intervenciones repetitivas sin criterios técnicos aumentan la cantidad de heridas, favorecen procesos de deterioro interno y reducen la capacidad del árbol para responder frente a condiciones ambientales adversas.

En conjunto, estas prácticas evidencian la importancia de basar la poda en criterios técnicos sólidos. Evitar intervenciones severas e innecesarias permite mantener la estabilidad estructural, conservar la funcionalidad del árbol y fortalecer una gestión urbana más coherente y sostenible.

4.3.5 Técnica correcta de corte y fundamentos anatómicos

La calidad de la poda depende en gran medida de la correcta ejecución de los cortes. Cada intervención genera una herida que activa mecanismos de defensa, y su evolución está directamente relacionada con la ubicación anatómica y la precisión del corte. Un corte bien realizado facilita la compartimentación del daño, mientras que un corte incorrecto puede convertirse en el punto de inicio de procesos de deterioro interno (Shigo, 1984; Gilman, 2012).

El corte debe realizarse inmediatamente por fuera del collar de la rama, una estructura especializada que contiene tejidos capaces de iniciar el cierre de la herida. Cortar al ras del tronco elimina esta zona protectora y dificulta la compartimentación, mientras que dejar un tocón impide el cierre adecuado y favorece la entrada de organismos degradadores. Este detalle anatómico, aunque aparentemente simple, tiene implicaciones directas en la resistencia residual del fuste y en la estabilidad del árbol a mediano y largo plazo.

La relación entre la ubicación del corte y sus efectos estructurales puede observarse en daños asociados a intervenciones inadecuadas, como se ilustra en la Figura 4.3.

Figura 4.3

*Daño en el tronco asociado a intervención inadecuada***.**



Nota. Las heridas mal ubicadas o extensas pueden interferir con la compartimentación, favorecer procesos de deterioro interno y reducir la resistencia residual del tejido leñoso.

En ramas de mayor diámetro, la técnica de tres cortes resulta esencial para evitar desgarros de corteza y daños al fuste. Este procedimiento permite controlar la caída del segmento removido, reducir tensiones mecánicas y proteger los tejidos adyacentes. Su aplicación adecuada disminuye la magnitud de la herida final y mejora la capacidad de respuesta del árbol.

El tamaño del corte también influye en la probabilidad de deterioro. A medida que aumenta el diámetro de la herida, la eficacia relativa de la compartimentación disminuye, lo que incrementa el riesgo de degradación interna. Por esta razón, la formación estructural temprana y la corrección oportuna de defectos resultan

más eficientes que intervenciones tardías que requieren cortes extensos (Shigo, 1984; Gilman, 2012).

La evidencia científica no respalda el uso rutinario de selladores o pastas cicatrizantes. Estos productos pueden interferir con los procesos naturales de defensa y no mejoran la compartimentación. La prioridad técnica debe centrarse en realizar cortes limpios, bien ubicados y ejecutados con herramientas adecuadamente afiladas.

En conjunto, la técnica de corte constituye un aspecto fundamental en la poda urbana. La precisión en su ejecución no solo favorece la recuperación del árbol, sino que también reduce la probabilidad de deterioro estructural y contribuye a una gestión más eficiente y sostenible del arbolado urbano.

4.4 Intervenciones estructurales complementarias

Cuando la evaluación técnica identifica defectos estructurales moderados o localizados, la remoción del árbol no siempre es la única opción. Existen intervenciones que permiten reducir el riesgo manteniendo al individuo en pie, siempre que se apliquen con criterio técnico, proporcionalidad y seguimiento. Este enfoque reconoce al árbol como una estructura viva capaz de adaptarse y redistribuir cargas, y plantea que la gestión urbana debe equilibrar la seguridad con la conservación de los beneficios ecosistémicos (Niklas, 1992; Dunster et al., 2017).

Una de las intervenciones más utilizadas es la reducción selectiva de peso en ramas específicas. A diferencia de la poda generalizada, esta técnica se enfoca en puntos críticos donde se ha identificado sobrecarga o mayor exposición al viento. Su objetivo es disminuir el momento de flexión sin alterar de forma significativa la arquitectura del árbol. Para que sea efectiva, la reducción debe respetar el patrón natural de ramificación, evitar cortes de gran diámetro y mantener la funcionalidad de la copa (Shigo, 1984; Gilman, 2012).

Cuando se aplica correctamente, esta intervención puede redistribuir tensiones y mejorar la estabilidad sin comprometer la capacidad fotosintética. Sin embargo, su eficacia depende de un diagnóstico previo claro y de la evaluación continua del comportamiento del árbol (Smiley et al., 2017).

Otra alternativa es la instalación de sistemas de soporte estructural, como cables o anclajes, en ramas o ejes codominantes con uniones débiles. Estos sistemas buscan limitar el movimiento excesivo, reducir tensiones y disminuir la probabilidad de falla en puntos críticos, especialmente en uniones con inclusión de corteza.

Es importante considerar que estos sistemas no reemplazan la resistencia estructural del árbol. Su función es complementaria y requiere instalación adecuada, inspecciones periódicas y mantenimiento continuo. No deben utilizarse como solución permanente en individuos con deterioro avanzado, ya que la estabilidad sigue dependiendo de la calidad del tejido leñoso y de la sección estructural disponible (Niklas, 1992; Peltola, 2006).

En situaciones donde existen cavidades o defectos en la base del fuste, la interpretación debe realizarse con cautela. La presencia de una cavidad no implica necesariamente riesgo inmediato. La estabilidad depende del espesor de madera sana remanente, la forma del defecto y la distribución de cargas. En estos casos, puede ser necesario complementar la evaluación con análisis más detallados, especialmente cuando el nivel de exposición es alto (Kane & Ryan, 2004).

En ciudades tropicales como Panamá, las condiciones climáticas influyen de manera directa en la estabilidad estructural. Durante periodos de lluvias intensas, la saturación del suelo reduce la capacidad de anclaje, lo que aumenta la susceptibilidad al volcamiento, especialmente en árboles con sistemas radicales limitados o afectados por obras civiles. Por ello, la programación de estas intervenciones debe considerar la estacionalidad y las condiciones del sitio (Peltola, 2006).

En conjunto, las intervenciones estructurales complementarias permiten conservar árboles que aún mantienen viabilidad estructural, reduciendo el riesgo sin recurrir a la remoción. Su aplicación exige diagnóstico preciso, criterio biomecánico y seguimiento en el tiempo, garantizando que las decisiones se mantengan coherentes con la condición del árbol y con el entorno urbano.

4.5 Tala y sustitución como medida de último recurso

La tala es la intervención más drástica en la gestión del arbolado urbano y debe considerarse únicamente cuando no existen alternativas viables. A diferencia de otras intervenciones, implica la pérdida total del árbol y de todos los beneficios que aporta a la ciudad, por lo que su aplicación requiere un diagnóstico técnico sólido, una evaluación de riesgo bien documentada y el cumplimiento del marco normativo vigente.

La gestión responsable no busca eliminar completamente el riesgo, sino reducirlo a niveles aceptables mediante decisiones proporcionales. En este sentido, la tala no debe responder a percepciones subjetivas de peligro, sino a evidencia técnica que justifique la intervención y permita sustentarla institucionalmente (Dunster et al., 2017). La naturaleza irreversible de esta acción puede observarse en la Figura 4.4, donde se presenta el remanente de una remoción total del árbol

Figura 4.4

Tocón resultante de tala urbana



Nota. La tala constituye una medida de último recurso y supone la pérdida inmediata de funciones estructurales, ecológicas y paisajísticas del árbol, por lo que debe estar respaldada por diagnóstico técnico y justificación institucional.

En el contexto tropical de Panamá, las condiciones climáticas influyen en la estabilidad del arbolado. La saturación del suelo durante periodos de lluvia puede reducir temporalmente la capacidad de anclaje, aumentando la susceptibilidad al volcamiento en árboles con restricciones radiculares. No obstante, esta condición debe analizarse con cautela y no interpretarse automáticamente como una justificación para la tala, sino como un factor adicional dentro del análisis estructural (Niklas, 1992; Peltola, 2006).

La tala también debe articularse con el marco normativo nacional, lo que implica cumplir con los procedimientos establecidos por la autoridad ambiental competente. Este proceso fortalece la trazabilidad de la decisión, reduce la

arbitrariedad y permite sustentar técnicamente la intervención ante cualquier revisión o conflicto.

Cuando la tala es necesaria, la sustitución debe planificarse de manera estratégica. La pérdida de un árbol maduro no se compensa de forma inmediata, por lo que la reposición debe considerar la selección adecuada de especies, la compatibilidad con el sitio, la diversidad y la resiliencia frente a condiciones climáticas futuras (Roman et al., 2020). Este enfoque permite mantener la cobertura arbórea y reducir la recurrencia de conflictos estructurales en el tiempo.

El manejo del arbolado urbano debe entenderse como un proceso integrado que articula evaluación, intervención y planificación. A lo largo del capítulo se ha establecido que la calidad de la gestión no depende de la intensidad de las acciones, sino de su coherencia técnica. La poda, las intervenciones estructurales y la tala deben responder a un mismo principio: decisiones fundamentadas, proporcionales y documentadas.

La tala, en este marco, representa una medida excepcional. Su aplicación debe estar vinculada a la seguridad pública, pero también a una visión de largo plazo que reconozca al arbolado urbano como infraestructura viva. La profesionalización del manejo exige protocolos claros, formación técnica continua y coordinación institucional, garantizando que cada decisión contribuya a una ciudad más segura, resiliente y ambientalmente sostenible.

Finalmente, con el propósito de estandarizar las prácticas de intervención, se presenta en el Anexo C un protocolo técnico que integra criterios fisiológicos, biomecánicos y normativos aplicables al contexto urbano de Panamá.

10.69821/978-628-97750-2-0

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL RIESGO EN EL ARBOLADO URBANO

La evaluación del riesgo en el arbolado urbano constituye un proceso técnico orientado a estimar la probabilidad de falla de un árbol o de alguna de sus partes, así como las consecuencias asociadas a su interacción con el entorno construido. Este análisis integra información estructural, sanitaria y del sitio, permitiendo sustentar decisiones de manejo bajo criterios verificables y consistentes.

El diagnóstico no se limita a identificar defectos visibles, sino que exige interpretar el árbol como un sistema dinámico sometido a cargas mecánicas, procesos biológicos y condiciones ambientales variables. La estabilidad estructural no es una condición estática, sino el resultado de un equilibrio cambiante entre crecimiento, adaptación y deterioro, lo que implica que el riesgo también evoluciona en el tiempo.

En el entorno urbano, donde los árboles comparten espacio con infraestructura, tránsito y actividades humanas, la evaluación del riesgo adquiere un papel central en la gestión. Su aplicación sistemática permite priorizar intervenciones, reducir la probabilidad de fallas con consecuencias relevantes y orientar el manejo hacia criterios técnicos que reconozcan al arbolado como infraestructura viva.

5.1 Concepto de riesgo en arboricultura

El concepto de riesgo en arboricultura se fundamenta en la relación entre la probabilidad de falla de un árbol o de alguna de sus partes y las consecuencias que dicha falla puede generar sobre personas, bienes o infraestructura. Este enfoque reconoce que el riesgo no depende únicamente de la condición estructural del árbol, sino también de su interacción con el entorno y del nivel de exposición asociado.

Un árbol con defectos estructurales no necesariamente representa un riesgo elevado si se ubica en un espacio con baja ocupación o sin presencia de dianas. De igual manera, un árbol aparentemente sano puede constituir un riesgo significativo si se encuentra en un área de alta circulación o próximo a infraestructura crítica. El riesgo surge de la combinación entre la probabilidad de falla y la magnitud de sus consecuencias, lo que requiere un análisis integrado (Dunster et al., 2017).

Como se observa en la Figura 5.1, el riesgo arbóreo se configura a partir de la interacción entre la probabilidad de falla, la exposición y la consecuencia, lo que permite estructurar su análisis bajo un enfoque integrador.

Figura 5.1

Modelo conceptual de evaluación del riesgo en arbolado urbano



Nota. El riesgo se configura a partir de la interacción entre la probabilidad de falla estructural, el nivel de exposición y la severidad de la consecuencia, constituyendo un enfoque integrador para la evaluación del arbolado urbano.

En arboricultura, el riesgo se interpreta como una condición dinámica influida por factores biológicos, mecánicos y ambientales. El crecimiento, el deterioro interno, las condiciones del suelo, las intervenciones previas y la exposición a cargas como viento o lluvia modifican continuamente el comportamiento estructural del árbol. Esta variabilidad implica que la evaluación debe

actualizarse en función del tiempo y de los cambios del entorno (Niklas, 1992; Peltola, 2006).

El análisis del riesgo en arbolado urbano se apoya en metodologías estructuradas que reducen la subjetividad y mejoran la consistencia técnica. Entre ellas destacan los sistemas promovidos por *la International Society of Arboriculture* (ISA), que integran observación visual, interpretación biomecánica y valoración de la exposición para clasificar el nivel de riesgo y orientar decisiones de manejo (Dunster et al., 2017; Smiley et al., 2017).

Resulta fundamental diferenciar riesgo y peligro. El peligro corresponde a la existencia de un defecto o condición potencialmente dañina; el riesgo incorpora la probabilidad de falla y sus consecuencias. Esta distinción evita decisiones basadas únicamente en defectos visibles y favorece evaluaciones proporcionales.

En el entorno urbano, el concepto de riesgo adquiere carácter operativo. Permite priorizar intervenciones, optimizar recursos y sustentar técnicamente las decisiones ante la administración y la ciudadanía. Además, contribuye a establecer protocolos de gestión que equilibran seguridad y conservación del arbolado como infraestructura verde.

El riesgo en arboricultura no es una propiedad inherente del árbol, sino el resultado de la interacción entre su condición estructural, su respuesta biomecánica y el entorno. Comprender esta relación permite una gestión técnica, coherente y basada en evidencia.

5.1.1 El árbol como sistema biológico estructural

La base conceptual de la evaluación del riesgo arbóreo radica en comprender al árbol como un sistema biológico estructural integrado. A diferencia de las estructuras artificiales, cuyos materiales presentan propiedades relativamente constantes, el árbol es un organismo leñoso en crecimiento continuo, cuya estabilidad depende de la interacción dinámica entre raíces, fuste, copa y condiciones ambientales del sitio (Niklas, 1992). Esta condición biológica

introduce variabilidad estructural y capacidad adaptativa frente a cargas externas, particularmente viento, peso propio y saturación del suelo.

Desde la biomecánica vegetal, la estabilidad se explica por la relación entre la geometría del individuo, las propiedades del material leñoso y las fuerzas aplicadas (Peltola, 2006). La madera no es un material homogéneo; su resistencia depende de la orientación de fibras, la densidad, el contenido hídrico y la integridad anatómica. Defectos como cavidades internas, grietas longitudinales, uniones codominantes con inclusión de corteza o pérdida significativa de sección resistente pueden modificar la capacidad del árbol para soportar momentos de flexión inducidos por cargas dinámicas.

Simultáneamente, el árbol posee mecanismos biológicos de defensa ante el daño. El modelo CODIT describe cómo el individuo limita la propagación del deterioro mediante la formación de barreras anatómicas y químicas alrededor del tejido afectado (Shigo, 1984). Sin embargo, esta capacidad de compartimentación no es ilimitada; heridas extensas, deterioro avanzado o intervenciones inadecuadas pueden superar la eficacia defensiva y comprometer progresivamente la estabilidad estructural.

Reconocer al árbol como sistema biológico estructural permite interpretar los defectos observados no como fallas automáticas, sino como alteraciones que deben analizarse en función de su impacto real sobre la resistencia mecánica. Esta comprensión evita decisiones simplistas basadas exclusivamente en la apariencia externa y fundamenta un análisis técnico más preciso.

5.1.2 Secuencia metodológica de evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo arbóreo debe desarrollarse siguiendo una secuencia metodológica clara que asegure coherencia y consistencia técnica.

La primera etapa corresponde a la observación estructurada en campo. En esta fase se registran de manera objetiva los síntomas visibles, tales como inclinación anormal del fuste, levantamiento del suelo, raíces expuestas o seccionadas,

cavidades, grietas, ramas muertas de gran diámetro, uniones codominantes con inclusión de corteza o interferencias con infraestructura. La observación debe describir lo que se evidencia, evitando interpretaciones prematuras o conclusiones anticipadas.

La segunda etapa consiste en el diagnóstico técnico. Aquí se interpretan los síntomas observados a la luz de principios biológicos y biomecánicos. El evaluador determina si los defectos identificados afectan significativamente la sección resistente efectiva o la capacidad de anclaje del árbol. Esta fase exige integrar conocimientos de anatomía de la madera, arquitectura estructural y comportamiento bajo cargas dinámicas (Niklas, 1992; Peltola, 2006).

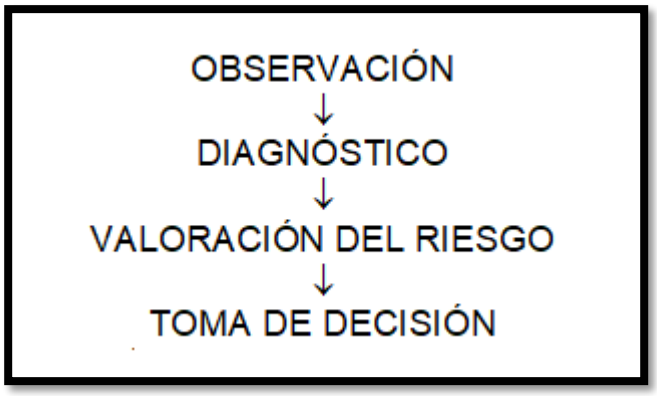
La tercera etapa corresponde a la valoración del riesgo. En esta fase se estima la probabilidad de falla estructural, la probabilidad de que la parte fallada impacte una diana y la severidad de la consecuencia potencial. El análisis debe considerar el uso del espacio público, la densidad peatonal, la proximidad de edificaciones y la importancia de la infraestructura circundante.

Finalmente, la cuarta etapa implica la toma de decisión proporcional. Las acciones pueden incluir monitoreo periódico, intervención correctiva selectiva, instalación de sistemas de soporte o, cuando el riesgo se considere alto y no mitigable, la remoción del individuo. Esta decisión debe quedar documentada, junto con la justificación técnica correspondiente, asegurando trazabilidad y respaldo institucional.

La secuencia metodológica de evaluación del riesgo arbóreo se sintetiza en la Figura 5.2.

Figura 5.2

Secuencia metodológica para la evaluación del riesgo en arbolado urbano



Nota. La evaluación del riesgo arbóreo se desarrolla mediante una secuencia estructurada que integra la observación en campo, el diagnóstico biomecánico y sanitario, la valoración de la probabilidad de falla y la exposición, y la toma de decisiones proporcional al nivel de riesgo estimado.

Esta secuencia metodológica permite estructurar el análisis del riesgo bajo un enfoque lógico y reproducible, facilitando la coherencia entre la observación en campo y la toma de decisiones. Su aplicación contribuye a reducir la subjetividad en la evaluación, fortalecer la consistencia técnica entre evaluadores y garantizar la trazabilidad de las decisiones dentro de la gestión del arbolado urbano.

5.1.3 Evaluación proporcional del riesgo y alineación con ISA

La evaluación proporcional del riesgo constituye uno de los principios centrales de la arboricultura moderna. La ISA mantiene y actualiza un marco metodológico orientado a la consistencia técnica, la claridad terminológica y la trazabilidad de la evaluación, consolidado en la tercera edición del *Tree Risk Assessment Manual* y del *Best Management Practices—Tree Risk Assessment*, ambos publicados en 2025. Estos documentos organizan la evaluación del riesgo alrededor del análisis del árbol, del sitio, de las dianas potenciales, de las medidas de mitigación y del reporte técnico.

Este énfasis contemporáneo en la estandarización responde a la evidencia de que la variabilidad interevaluador puede afectar la categorización del riesgo cuando no

existen criterios claramente definidos. Por ello, la alineación con estándares internacionales no debe entenderse como adopción formalista, sino como mecanismo para fortalecer la coherencia técnica, reducir ambigüedades interpretativas y consolidar la evaluación proporcional del riesgo como herramienta estructurada y verificable en la gestión municipal.

De acuerdo con la International Society of Arboriculture, el riesgo no debe entenderse como la mera presencia de un defecto estructural, sino como la probabilidad razonable de falla combinada con la presencia de una diana susceptible (Dunster et al., 2017). En este marco, la eliminación automática de árboles ante cualquier signo de deterioro no se considera práctica técnica adecuada.

El modelo ISA/TRAQ propone un enfoque estructurado que clasifica el riesgo en categorías cualitativas, integrando probabilidad de falla, probabilidad de impacto y consecuencias potenciales. Este modelo enfatiza la importancia de la experiencia del evaluador, la documentación clara y la consistencia metodológica.

La proporcionalidad implica que la severidad de la intervención debe corresponder al nivel de riesgo estimado. Un árbol con defectos moderados en un área de baja ocupación puede gestionarse mediante monitoreo, mientras que un defecto similar en un entorno de alta exposición puede requerir intervención inmediata. Esta lógica evita tanto la negligencia técnica como la sobreintervención injustificada.

En ciudades latinoamericanas, la distribución y condición del arbolado urbano se encuentra estrechamente vinculada con patrones de planificación urbana y densidad de infraestructura, lo que influye directamente en la exposición al riesgo y en las decisiones de manejo del arbolado (Romero et al., 2012).

En el contexto de la Ciudad de Panamá, donde la estacionalidad de lluvias y la ocurrencia de tormentas convectivas pueden modificar temporalmente la estabilidad del sistema raíz–suelo (Peltola, 2006), la evaluación proporcional debe

incorporar también la variabilidad ambiental estacional. La planificación preventiva basada en exposición y uso del espacio público fortalece la gestión responsable del arbolado urbano.

5.2 Observación estructurada en campo

La evaluación estructurada en campo constituye la primera fase operativa dentro del proceso de análisis del riesgo arbóreo. Su propósito es registrar de manera objetiva, sistemática y documentada las condiciones visibles del árbol y su entorno inmediato, evitando interpretaciones prematuras que puedan sesgar el diagnóstico posterior. En arboricultura profesional, la calidad del diagnóstico depende directamente de la precisión en esta etapa inicial, ya que los defectos estructurales relevantes suelen manifestarse a través de indicadores externos que requieren una lectura técnica especializada.

Esta fase no debe confundirse con una inspección superficial. Implica una revisión visual organizada que integra conocimientos de anatomía vegetal, biomecánica estructural y dinámica ambiental, permitiendo identificar síntomas asociados a posibles defectos internos o alteraciones en la estabilidad mecánica del árbol. De igual forma, incorpora la caracterización del entorno urbano como un factor determinante en la exposición al riesgo.

En el ámbito urbano panameño, donde la estacionalidad de las lluvias influye en la resistencia del sistema raíz–suelo y en la dinámica de las cargas aerodinámicas, esta etapa adquiere especial relevancia. La interacción entre las condiciones edáficas, la arquitectura del árbol y el uso del espacio urbano debe analizarse de manera integrada, con el fin de asegurar coherencia técnica en las fases posteriores de diagnóstico y valoración.

5.2.1 Inspección del sistema radical y zona de anclaje

La estabilidad estructural de un árbol urbano depende en gran medida de la integridad del sistema radical y de su interacción con el suelo circundante. El sistema raíz–suelo constituye la base del anclaje mecánico y es responsable de

resistir momentos de volcamiento inducidos por cargas dinámicas, particularmente viento y saturación hídrica (Peltola, 2006). Por ello, la inspección del sistema radical representa un componente crítico de la observación estructurada.

En la evaluación de campo deben registrarse indicadores como levantamiento del suelo en el lado opuesto a la inclinación del fuste, raíces expuestas, fracturadas o seccionadas por obras civiles, presencia de cavidades basales, deterioro en la zona del cuello radicular y signos de pudrición. Estos elementos pueden sugerir pérdida de capacidad de anclaje o redistribución anómala de tensiones mecánicas.

En entornos urbanos densamente construidos, el sellado superficial, la compactación del suelo y la reducción del volumen radicular disponible limitan el desarrollo normal del sistema radical. Estas restricciones pueden generar patrones de crecimiento asimétricos que afectan la estabilidad a largo plazo. La observación debe considerar no solo el estado actual del suelo, sino también evidencias de intervenciones previas, tales como excavaciones, instalación de tuberías o ampliación de aceras.

En climas tropicales húmedos, la saturación temporal del suelo reduce la resistencia al corte y la fricción raíz–suelo, modificando temporalmente la estabilidad del árbol (Peltola, 2006). Por tanto, la inclinación leve observada en temporada seca puede adquirir mayor relevancia durante periodos de precipitación intensa, lo que exige interpretar la observación dentro del contexto ambiental local.

La evaluación proporcional del riesgo arbóreo requiere integrar simultáneamente la condición estructural, el estado sanitario, los factores ambientales y el grado de exposición urbana. Esta interacción sistémica se representa de manera esquemática en la Figura 5.3, donde se evidencia que el riesgo no constituye un atributo aislado del árbol, sino el resultado de la convergencia de múltiples dimensiones técnicas.

Figura 5.3

Volcamiento de árbol urbano asociado a falla del sistema raíz–suelo en área urbana.



Nota. Árbol urbano caído con levantamiento del plato radicular, evidencia típica de pérdida de anclaje estructural del sistema raíz–suelo. Este tipo de falla suele asociarse a saturación del suelo, compactación o limitación del sistema radical en entornos urbanos (Peltola, 2006; Niklas, 1992).

Fuente: Adaptado de *La Prensa* (Panamá), fotografía periodística publicada en cobertura de evento de caída de árbol urbano.

5.2.2 Evaluación del fuste y sección resistente

El fuste constituye el principal elemento portante del árbol, encargado de transmitir cargas desde la copa hacia el sistema radical. Su estabilidad depende de la integridad de la sección transversal efectiva y de la calidad del material leñoso (Niklas, 1992). Durante la observación estructurada deben identificarse defectos visibles que puedan indicar reducción de la capacidad resistente.

Entre los indicadores relevantes se incluyen cavidades abiertas, grietas longitudinales, exudaciones, abultamientos anómalos, heridas extensas y presencia de cuerpos fructíferos de hongos xilófagos. Si bien la existencia de cavidades no implica automáticamente falla inminente, su ubicación y extensión pueden afectar significativamente la sección resistente, especialmente cuando se concentran en zonas sometidas a mayor momento de flexión.

La interpretación de estos defectos requiere considerar la distribución de tensiones en el fuste. En condiciones de viento, las mayores tensiones de tracción y compresión se concentran en los bordes externos de la sección transversal. La pérdida de madera en estas zonas críticas puede reducir la capacidad de soportar cargas dinámicas (Niklas, 1992).

La observación también debe evaluar la presencia de uniones codominantes con inclusión de corteza, las cuales pueden generar planos de debilidad estructural. Estas uniones, especialmente cuando presentan grietas visibles o separación incipiente, representan puntos potenciales de falla bajo cargas dinámicas intensas.

5.2.3 Evaluación de la copa y arquitectura estructural

La arquitectura de la copa influye directamente en la distribución de masa y en la respuesta aerodinámica del árbol frente al viento. La observación estructurada debe considerar la simetría de la copa, la distribución de ramas principales, la presencia de ramas muertas de gran diámetro y el historial de intervenciones previas, como podas severas o descope.

La forma y densidad de la copa determinan el coeficiente de arrastre aerodinámico y, por tanto, el nivel de carga transmitida al fuste y al sistema radical durante eventos de viento intenso (James et al., 2006). Copas densas y asimétricas pueden generar momentos de torsión adicionales, especialmente cuando el crecimiento ha sido dirigido hacia espacios abiertos o alejado de obstáculos urbanos.

La presencia de brotes epicórmicos abundantes puede indicar intervenciones previas severas. Estas ramas, al desarrollarse rápidamente y con inserciones menos profundas, suelen presentar menor resistencia estructural en comparación con ramas formadas durante el crecimiento natural (Gilman, 2012). La observación debe registrar su ubicación y diámetro relativo, dado que pueden constituir puntos de fractura potencial.

Asimismo, la evaluación debe considerar la proporción entre altura total y diámetro del fuste, así como la relación entre masa aérea y sistema radical visible. Árboles excesivamente esbeltos o con copas desbalanceadas pueden presentar mayor susceptibilidad ante cargas dinámicas, especialmente en suelos saturados.

5.2.4 Caracterización del entorno urbano y exposición

La observación estructurada no se limita al árbol en sí mismo, sino que debe extenderse al entorno inmediato. El riesgo arbóreo solo puede entenderse plenamente cuando se analiza en relación con la exposición urbana. La probabilidad de impacto y la severidad de la consecuencia dependen de la presencia de dianas tales como peatones, viviendas, vehículos, redes eléctricas o infraestructura crítica (Dunster et al., 2017).

La caracterización del entorno incluye la identificación del tipo de espacio urbano —residencial, comercial, institucional—, la intensidad de uso peatonal, la proximidad a edificaciones y la presencia de infraestructura aérea o subterránea. Un árbol con defectos estructurales moderados puede representar bajo riesgo en un área de escasa ocupación, pero riesgo elevado en una zona de alta densidad poblacional.

En el entorno urbano del distrito capital, la coexistencia entre arbolado urbano maduro, redes eléctricas aéreas y alta densidad de infraestructura genera escenarios complejos de interacción entre los árboles y el espacio construido, lo que exige incorporar criterios de evaluación del riesgo dentro de la planificación y el manejo del arbolado urbano (Municipio de Panamá, 2016).

La integración de la caracterización ambiental con la observación estructural garantiza que el análisis posterior de riesgo sea contextual y proporcional. Esta fase cierra el proceso de observación estructurada y establece la base objetiva para el diagnóstico técnico desarrollado en el siguiente apartado.

5.3 Diagnóstico estructural como determinante de probabilidad de falla

El diagnóstico estructural constituye la fase analítica posterior a la observación en campo y representa el punto donde los síntomas visibles se interpretan a la luz de principios biomecánicos y biológicos. Mientras la observación describe evidencias objetivas, el diagnóstico determina su relevancia estructural y su influencia real en la probabilidad de falla. En el contexto de la evaluación del riesgo arbóreo, esta etapa resulta determinante, ya que permite diferenciar entre defectos tolerables dentro de la arquitectura natural del árbol y alteraciones que comprometen significativamente su estabilidad.

Desde la biomecánica vegetal, la falla estructural ocurre cuando las tensiones inducidas por cargas externas superan la resistencia del material leñoso en una sección determinada (Niklas, 1992). Por tanto, el diagnóstico debe centrarse en evaluar si los defectos identificados reducen la sección resistente efectiva o alteran la capacidad del sistema raíz–suelo para soportar momentos de flexión. Este análisis requiere integrar conocimientos de anatomía de la madera, arquitectura estructural y comportamiento dinámico frente al viento (Peltola, 2006).

En arboricultura urbana, la probabilidad de falla no puede inferirse únicamente por la presencia de deterioro visible. Árboles con cavidades pueden conservar suficiente madera sana para mantener estabilidad estructural, mientras que defectos aparentemente menores, como una unión codominante con inclusión de corteza, pueden representar puntos críticos de fractura bajo cargas dinámicas intensas. El diagnóstico técnico debe, por tanto, ponderar ubicación, extensión y distribución de los defectos dentro del sistema estructural completo.

En entornos urbanos latinoamericanos con régimen climático tropical, la interacción entre el arbolado urbano, el crecimiento acelerado de las ciudades y las condiciones climáticas intensas plantea desafíos particulares para la evaluación del riesgo arbóreo, lo que ha motivado el desarrollo de enfoques de

gestión adaptados a realidades regionales (Red Latinoamericana de Bosques Urbanos, 2020).

Diversos estudios realizados en ciudades latinoamericanas han demostrado que las limitaciones espaciales, la compactación del suelo y la interacción con infraestructura urbana influyen significativamente en la arquitectura estructural y estabilidad del arbolado urbano (Benavides & Escobedo, 2014).

En la Ciudad de Panamá, la estacionalidad de las lluvias constituye un factor determinante en la estabilidad del arbolado urbano. La saturación temporal del suelo reduce la resistencia al corte y altera la interacción raíz–suelo, lo que incrementa la probabilidad de volcamiento en individuos con sistemas radicales restringidos o deteriorados (Peltola, 2006). Por esta razón, el diagnóstico estructural debe integrar explícitamente la variabilidad ambiental dentro del análisis.

5.3.1 Defectos estructurales naturales y adquiridos

Los defectos estructurales pueden clasificarse en naturales, derivados del patrón de crecimiento del árbol, o adquiridos, producto de daños mecánicos, intervenciones humanas o procesos patológicos. Entre los defectos naturales más relevantes se encuentran las uniones codominantes con inclusión de corteza. Estas uniones se caracterizan por la ausencia de tejido de unión adecuado entre los ejes estructurales, generando planos de debilidad que pueden abrirse progresivamente bajo carga (Gilman, 2012).

Las grietas longitudinales y las fracturas parciales constituyen indicadores de redistribución interna de tensiones. Su presencia debe analizarse en función de su profundidad, orientación y ubicación respecto al eje principal de carga. No toda grieta implica inminencia de falla, pero su progresión puede modificar significativamente la resistencia estructural.

Entre los defectos adquiridos, las heridas extensas y las cavidades asociadas a pudrición interna representan factores críticos. La pérdida de madera reduce la

sección resistente efectiva y altera la distribución de tensiones en el fuste. Sin embargo, investigaciones han demostrado que la estabilidad depende no solo del tamaño de la cavidad, sino del espesor residual de madera sana y su distribución alrededor del perímetro (Kane & Ryan, 2004). Por ello, el diagnóstico debe evitar criterios simplistas basados únicamente en el diámetro visible del hueco.

5.3.2 Pérdida de sección resistente y estabilidad mecánica

La resistencia estructural del fuste depende de la integridad de su sección transversal efectiva. Desde el punto de vista mecánico, la capacidad de soportar momentos de flexión está relacionada con el módulo de sección, que aumenta exponencialmente hacia el perímetro externo del fuste (Niklas, 1992). La pérdida de madera en zonas periféricas tiene mayor impacto estructural que el deterioro central, siempre que exista un anillo continuo de tejido sano que mantenga la capacidad portante.

La evaluación diagnóstica debe considerar la proporción de madera residual, la continuidad del tejido sano y la ubicación del deterioro respecto a la dirección predominante de carga. En árboles inclinados, por ejemplo, la zona sometida a tensión puede presentar mayor susceptibilidad a fractura si la sección resistente está comprometida en ese sector.

La literatura en biomecánica arbórea enfatiza que la estabilidad no es una propiedad binaria, sino un gradiente continuo. La probabilidad de falla aumenta progresivamente a medida que se reduce la sección resistente o se incrementan las cargas dinámicas. Este enfoque probabilístico evita clasificaciones absolutas y favorece decisiones proporcionales basadas en evidencia (Dunster et al., 2017).

5.3.3 Influencia del sistema raíz–suelo en la probabilidad de volcamiento

El diagnóstico estructural no puede limitarse al fuste. El sistema radical constituye el elemento de anclaje que contrarresta el momento de volcamiento inducido por viento o peso asimétrico de la copa. La estabilidad depende de la profundidad, extensión lateral y calidad del contacto raíz–suelo (Peltola, 2006).

Bajo condiciones urbanas, la compactación del suelo, el sellado superficial y las intervenciones constructivas reducen el volumen radicular disponible. La pérdida de raíces estructurales asociada a excavaciones o ampliaciones de aceras puede generar asimetrías no siempre visibles externamente, pero que afectan la capacidad de anclaje.

Durante temporadas de lluvia intensa, la saturación del suelo disminuye la fricción entre partículas y reduce la resistencia al corte, aumentando temporalmente la probabilidad de volcamiento. En la Ciudad de Panamá, esta condición debe incorporarse explícitamente en el diagnóstico estructural, especialmente en individuos con inclinación preexistente o evidencias de levantamiento del suelo.

El análisis integral del sistema raíz–fuste–copa permite estimar con mayor precisión la probabilidad de falla. El diagnóstico estructural, por tanto, no es una apreciación aislada de defectos visibles, sino una interpretación integrada del comportamiento mecánico del árbol como sistema biológico completo.

5.4 Diagnóstico sanitario y su influencia en la probabilidad de falla

El estado sanitario del árbol constituye un componente determinante en la evaluación del riesgo arbóreo, particularmente cuando los agentes bióticos o abióticos afectan la integridad estructural del tejido leñoso. Aunque no toda afección sanitaria implica un incremento inmediato del riesgo, ciertos procesos patológicos pueden reducir progresivamente la resistencia mecánica del árbol y modificar su probabilidad de falla. Por ello, el diagnóstico sanitario debe integrarse al análisis estructural y no abordarse como un componente aislado dentro de la evaluación del riesgo.

Desde la fisiología vegetal, los árboles responden al daño mediante diversos mecanismos de defensa que incluyen la compartimentación del deterioro, la formación de barreras químicas y anatómicas y la reorganización del crecimiento alrededor del tejido afectado (Shigo, 1984). Este proceso, conocido como compartimentación, permite limitar la propagación del deterioro dentro del fuste;

sin embargo, su eficacia depende del vigor fisiológico del individuo, la magnitud de la herida y la capacidad de respuesta de la especie.

Cuando el agente causal supera la capacidad defensiva del árbol, puede producirse degradación progresiva del tejido leñoso. En estos casos, el deterioro interno puede avanzar durante largos periodos sin manifestaciones externas evidentes, lo que dificulta su detección temprana mediante inspección visual. Por esta razón, el diagnóstico sanitario debe considerar tanto los síntomas visibles como los antecedentes de daño mecánico, podas severas o condiciones ambientales que favorezcan la actividad de organismos degradadores.

La literatura en patología forestal ha documentado ampliamente el papel de los hongos xilófagos en la degradación de los componentes estructurales de la madera. Estos organismos pueden afectar lignina y celulosa, alterando las propiedades físicas y mecánicas del tejido leñoso (Schwarze et al., 2000). Como consecuencia, se reduce la densidad y la rigidez del material, lo que disminuye la capacidad del fuste para resistir cargas de flexión inducidas por viento o peso de la copa (Niklas, 1992).

En condiciones climáticas tropicales húmedas, la combinación de alta humedad relativa y temperatura favorece la actividad de organismos xilófagos. Estas características generan un ambiente especialmente propicio para el desarrollo de procesos de pudrición interna, lo que refuerza la necesidad de integrar la evaluación sanitaria dentro del diagnóstico estructural del arbolado urbano. La presencia de cavidades en el fuste, heridas antiguas o cuerpos fructíferos de hongos en zonas basales debe interpretarse como un indicio potencial de degradación interna, particularmente cuando estos signos se localizan en sectores sometidos a mayores cargas estructurales. Como se observa en la Figura 5.4

Figura 5.4

Cavidades estructurales y deterioro del tejido leñoso en árbol urbano.



Nota. Ejemplar adulto de Delonix regia en entorno urbano de la Ciudad de Panamá que presenta cavidades abiertas y pérdida localizada de tejido leñoso en el fuste. Este tipo de defectos puede estar asociado a procesos de degradación interna producidos por hongos xilófagos o a heridas antiguas de poda que no lograron compartimentarse completamente. La reducción de la sección resistente del tronco puede modificar la estabilidad estructural del árbol y aumentar la probabilidad de falla bajo cargas dinámicas como viento o peso de la copa (Schwarze et al., 2000; Kane & Ryan, 2004).

5.4.1 Hongos de pudrición y degradación estructural

Los hongos xilófagos representan uno de los principales factores sanitarios asociados a reducción de estabilidad estructural en árboles urbanos. Estos organismos degradan selectivamente componentes de la madera, alterando sus propiedades físicas y mecánicas. La pudrición blanca afecta tanto lignina como celulosa, mientras que la pudrición parda degrada principalmente la celulosa, dejando una matriz frágil rica en lignina (Schwarze et al., 2000).

Desde el punto de vista estructural, la degradación reduce la resistencia a la compresión y flexión, aumentando la probabilidad de fractura bajo cargas dinámicas. Sin embargo, la

presencia de pudrición no implica automáticamente falla inminente. La estabilidad depende de la proporción y distribución de madera residual sana alrededor del perímetro del fuste (Kane & Ryan, 2004). Esta consideración refuerza la necesidad de un diagnóstico cuantitativo o al menos interpretativo basado en principios mecánicos, evitando decisiones precipitadas.

El modelo CODIT explica cómo el árbol intenta limitar la expansión del deterioro mediante barreras internas (Shigo, 1984). La eficacia de estas barreras varía entre especies y depende del vigor fisiológico del individuo. Árboles debilitados por estrés hídrico, compactación del suelo o intervenciones previas severas pueden presentar menor capacidad de compartimentación.

5.4.2 Factores fisiológicos y estrés crónico

El estrés fisiológico crónico puede influir indirectamente en la probabilidad de falla estructural. Factores como compactación del suelo, déficit hídrico, contaminación urbana o podas excesivas reducen la capacidad fotosintética y la producción de reservas energéticas. Estas reservas son fundamentales para sostener procesos de defensa y crecimiento compensatorio (Taiz et al., 2022).

Árboles sometidos a estrés prolongado pueden mostrar reducción en crecimiento radial, menor producción de madera de reacción y disminución en la capacidad de adaptación estructural frente a cargas dinámicas. La literatura en ecofisiología urbana destaca que la combinación de estrés térmico y limitación radicular puede afectar la vitalidad general del individuo, aumentando su susceptibilidad a agentes patógenos (Livesley et al., 2016).

El diagnóstico sanitario no debe limitarse a la identificación de patógenos visibles, sino que debe considerar la condición fisiológica general del árbol y su capacidad de respuesta frente a perturbaciones.

5.4.3 Interacción entre sanidad, estructura y exposición

La influencia del estado sanitario sobre el riesgo arbóreo solo puede entenderse plenamente cuando se integra con la probabilidad de falla y la exposición urbana. Un árbol con deterioro interno moderado puede representar bajo riesgo en un

área de escasa ocupación, pero riesgo elevado en una zona de alta densidad peatonal o proximidad a infraestructura crítica.

El enfoque promovido por la International Society of Arboriculture enfatiza que la evaluación del riesgo debe considerar simultáneamente condición estructural, probabilidad de impacto y consecuencia potencial (Dunster et al., 2017). La presencia de deterioro sanitario constituye un factor modificador de la probabilidad de falla, pero no determina por sí sola la decisión de remoción.

En climas tropicales, donde eventos convectivos intensos pueden generar cargas aerodinámicas significativas, la combinación de deterioro estructural interno y suelo saturado puede incrementar temporalmente el riesgo de fractura o volcamiento (Peltola, 2006). Esta interacción dinámica refuerza la necesidad de monitoreo periódico en individuos con defectos sanitarios identificados.

El diagnóstico sanitario debe integrarse como componente del análisis estructural y no abordarse de manera aislada. La presencia de hongos de pudrición, cavidades internas o estrés fisiológico crónico puede modificar la resistencia mecánica del árbol, pero su impacto real depende de la magnitud del deterioro, la distribución de madera residual y el contexto de exposición urbana.

5.5 Conflictos árbol–infraestructura y daños antropogénicos como modificadores del riesgo

En el contexto urbano, el riesgo arbóreo no depende únicamente de la condición biológica o estructural del árbol, sino también de su interacción con la infraestructura construida y las intervenciones humanas. Los conflictos árbol–infraestructura constituyen una de las principales causas de intervenciones reactivas en ciudades latinoamericanas y, en muchos casos, derivan de deficiencias en la planificación inicial de la arborización urbana. Por ello, el análisis del riesgo debe incorporar explícitamente los factores antrópicos que modifican tanto la probabilidad de falla como la magnitud de las consecuencias.

La literatura en silvicultura urbana reconoce que la implantación de árboles en espacios con volumen radicular insuficiente, suelos compactados o proximidad inmediata a redes aéreas y subterráneas genera conflictos estructurales progresivos (Konijnendijk et al., 2021). En estos escenarios, el árbol se ve obligado a adaptar su arquitectura a restricciones físicas que pueden alterar su estabilidad mecánica. La desviación asimétrica de raíces, el crecimiento inclinado del fuste hacia fuentes de luz o la formación de copas desequilibradas son respuestas adaptativas que pueden incrementar la susceptibilidad ante cargas dinámicas.

Desde la biomecánica, la pérdida parcial del sistema radical por excavaciones o ampliaciones de infraestructura reduce la capacidad de anclaje del árbol, aumentando la probabilidad de volcamiento bajo viento intenso (Peltola, 2006). Esta condición puede no ser inmediatamente visible, pero su efecto se manifiesta cuando se combinan suelos saturados y ráfagas convectivas, frecuentes en climas tropicales húmedos como el panameño. La evaluación del riesgo debe, por tanto, investigar antecedentes de obras civiles en el área de influencia radicular.

Los daños antropogénicos directos incluyen cortes de raíces, impactos mecánicos en el fuste, heridas por maquinaria, podas inadecuadas y descope. Estas intervenciones no solo generan heridas que activan procesos de compartimentación (Shigo, 1984), sino que pueden superar la capacidad defensiva del árbol y facilitar el ingreso de organismos degradadores. En términos estructurales, las heridas extensas reducen la sección resistente efectiva y pueden convertirse en puntos de concentración de tensiones bajo carga.

En ciudades donde la poda responde a demandas estéticas o percepciones subjetivas de peligro, la reducción drástica de copa constituye una práctica particularmente problemática. El descope altera la distribución natural de cargas, induce brotes epicórmicos con inserciones estructuralmente débiles y puede incrementar la probabilidad de fractura en el mediano plazo (Gilman, 2012). Desde el punto de vista del riesgo, esta práctica puede generar un escenario más inestable que la condición original del árbol.

La interferencia con redes eléctricas representa otro foco recurrente de conflicto urbano. La proximidad entre copa y tendido aéreo suele motivar intervenciones reiteradas que afectan la arquitectura estructural. Investigaciones en arboricultura urbana han demostrado que la selección inadecuada de especies para espacios reducidos incrementa significativamente los costos de mantenimiento y la frecuencia de podas correctivas (Nowak et al., 2014). Este problema tiene un origen preventivo más que correctivo, lo que refuerza la importancia de la planificación estratégica del arbolado.

En entornos urbanos densamente urbanizados, la proximidad entre el arbolado y las redes de infraestructura eléctrica puede generar conflictos operativos y riesgos potenciales para la seguridad pública. La interacción entre copas arbóreas y líneas eléctricas constituye uno de los problemas más recurrentes en la gestión del arbolado urbano (Konijnendijk et al., 2005).

La compactación del suelo, frecuente en zonas de alto tránsito peatonal o vehicular, constituye un daño antropogénico indirecto con impacto significativo sobre la estabilidad. La reducción de macroporosidad limita la aireación radicular, afecta el crecimiento y disminuye la capacidad del sistema raíz–suelo para resistir momentos de volcamiento. Estudios en ecohidrología urbana señalan que la combinación de compactación y sellado superficial modifica la infiltración y la dinámica hídrica, afectando indirectamente la estabilidad estructural (Livesley et al., 2016).

Un ejemplo de conflicto recurrente entre arbolado urbano e infraestructura crítica, que suele requerir evaluación técnica y coordinación institucional previa a la intervención, se presenta en la Figura 5.5

Figura 5.5

Interferencia entre copa arbórea y tendido eléctrico en entorno urbano de la Ciudad de Panamá.



Nota. La proximidad entre la copa del árbol y las líneas de distribución eléctrica constituye uno de los conflictos más frecuentes en la gestión del arbolado urbano, lo que exige evaluación técnica, coordinación institucional y definición de medidas de manejo proporcionales al riesgo.
Fuente. Fotografía de Andrei Vorotnikov.

Desde la perspectiva del riesgo, los conflictos árbol–infraestructura también modifican la severidad potencial de las consecuencias. La presencia de edificaciones, vehículos estacionados, redes eléctricas energizadas o zonas de alta densidad peatonal incrementa la magnitud del daño en caso de falla estructural. El modelo de evaluación promovido por la International Society of Arboriculture enfatiza que el riesgo no puede evaluarse sin considerar la probabilidad de impacto sobre una diana definida (Dunster et al., 2017).

En la Ciudad de Panamá, donde la expansión urbana ha integrado arbolado maduro dentro de entornos densamente ocupados, la coexistencia entre árboles y estructuras rígidas genera escenarios complejos de interacción. El análisis técnico debe diferenciar entre conflicto gestionable —mediante poda selectiva o rediseño del espacio— y condición estructural no mitigable que justifique remoción.

Los daños antropogénicos y los conflictos árbol–infraestructura inciden tanto en la probabilidad de falla como en la magnitud de la consecuencia potencial, por lo que su integración en el análisis del riesgo refuerza la coherencia metodológica y consolida la evaluación arbórea como herramienta técnica de gestión urbana basada en evidencia científica.

5.6 Integración diagnóstica y clasificación del nivel de riesgo

La integración diagnóstica constituye la fase culminante del proceso de evaluación del riesgo arbóreo. En esta etapa, los hallazgos derivados de la observación estructurada, el diagnóstico mecánico y sanitario, y la caracterización del entorno urbano se articulan en un análisis sintético orientado a estimar el nivel de riesgo. Esta integración no es una simple suma de defectos observados, sino una valoración estructurada que considera la interacción entre probabilidad de falla, probabilidad de impacto y severidad de consecuencia, conforme al enfoque promovido por la International Society of Arboriculture (Dunster et al., 2017).

El riesgo arbóreo debe entenderse como una variable compuesta. La probabilidad de falla depende de la condición estructural del árbol, incluyendo pérdida de sección resistente, defectos en uniones estructurales, deterioro sanitario avanzado o debilitamiento del sistema radical. La probabilidad de impacto se relaciona con la presencia de dianas —peatones, vehículos, edificaciones, redes eléctricas— dentro del área potencial de caída. Finalmente, la consecuencia potencial considera la magnitud del daño posible en términos humanos, económicos y funcionales.

La integración diagnóstica implica evaluar cómo interactúan estas tres dimensiones en un escenario específico. Un árbol con deterioro estructural

moderado puede representar bajo riesgo en un área de uso restringido, pero un riesgo elevado si se encuentra sobre una vía de alto tránsito peatonal. Este principio de contextualización constituye la base de la evaluación proporcional del riesgo y evita decisiones generalizadas o desproporcionadas (Dunster et al., 2017).

La clasificación cualitativa del riesgo puede expresarse en categorías como bajo, moderado, alto o crítico, siguiendo esquemas compatibles con el modelo ISA/TRAQ. Esta clasificación no sustituye el juicio profesional, sino que lo organiza dentro de un marco consistente y comunicable. Los niveles bajos suelen asociarse con monitoreo; los moderados, con intervención correctiva selectiva; los altos, con mitigación prioritaria; y los críticos, con intervención inmediata o remoción técnicamente justificada cuando no existan alternativas viables de mitigación.

5.7 Procedimiento aplicado en la Ciudad de Panamá

La aplicación del modelo de evaluación y diagnóstico del riesgo arbóreo en la Ciudad de Panamá requiere su adaptación al contexto climático, urbano e institucional local. Si bien los principios metodológicos se fundamentan en estándares internacionales promovidos por la International Society of Arboriculture, su implementación debe considerar variables propias del entorno tropical húmedo, la dinámica urbana metropolitana y el marco regulatorio vigente. Las publicaciones TRAQ 3.0 y las ediciones 2025 de los materiales de ISA refuerzan precisamente esa lógica de evaluación estructurada, documentación y reporte.

En el ámbito municipal, la evaluación del arbolado urbano se enmarca en la gestión ambiental local y debe articularse con los requerimientos administrativos establecidos por el Ministerio de Ambiente, particularmente cuando las intervenciones impliquen poda severa o tala. En consecuencia, el procedimiento aplicado no solo debe ser técnicamente riguroso, sino también documentalmente verificable.

5.7.1 Fase 1: identificación y registro del ejemplar

El procedimiento inicia con la identificación individual del árbol mediante registro georreferenciado, caracterización del espacio urbano y documentación fotográfica. La georreferenciación permite integrar el árbol dentro de un sistema de inventario municipal y facilita el seguimiento periódico.

En esta fase se consignan variables básicas tales como especie, diámetro a la altura del pecho, altura estimada, estado general y tipo de emplazamiento —acera, parque, área institucional o franja vial—. Este registro inicial constituye la base para la trazabilidad técnica y administrativa.

5.7.2 Fase 2: observación estructurada

Siguiendo el modelo desarrollado en los apartados anteriores, se realiza la observación sistemática del sistema radical, el fuste, la copa y el entorno inmediato. En esta etapa se documentan los defectos visibles, las interferencias con la infraestructura y los antecedentes de intervenciones.

En el contexto panameño, esta fase debe prestar especial atención a evidencias de compactación o sellado superficial del suelo, cortes radiculares asociados a obras civiles, inclinación del fuste posterior a temporadas lluviosas y presencia de cuerpos fructíferos en zonas basales.

La documentación fotográfica y descriptiva en esta etapa resulta fundamental para respaldar el diagnóstico posterior.

5.7.3 Fase 3: diagnóstico estructural y sanitario

Con base en la observación registrada, se procede a interpretar la relevancia estructural de los defectos identificados. Se analiza la posible pérdida de sección resistente, la condición de uniones estructurales críticas y la influencia del deterioro sanitario sobre la estabilidad mecánica.

El diagnóstico debe considerar las condiciones ambientales estacionales. Durante la temporada lluviosa, la saturación del suelo puede modificar la interacción raíz–

suelo (Peltola, 2006), lo que exige prudencia en la valoración de árboles inclinados o con sistemas radiculares comprometidos.

En esta fase se determina si los defectos observados constituyen factores relevantes que incrementan la probabilidad de falla o si representan condiciones tolerables bajo monitoreo.

5.7.4 Fase 4: valoración proporcional del riesgo

La valoración proporcional del riesgo constituye una fase clave dentro del proceso de evaluación del arbolado urbano, al integrar de manera conjunta la probabilidad de falla estructural, la probabilidad de impacto y la severidad de la consecuencia. La articulación de estas tres dimensiones permite construir una estimación más completa del riesgo, superando enfoques centrados únicamente en la condición del árbol.

En la Ciudad de Panamá, la variabilidad en la densidad peatonal y vehicular entre corregimientos introduce diferencias significativas en los niveles de exposición. Por ello, la evaluación debe considerar el uso real del espacio, la proximidad a infraestructura crítica y la frecuencia de ocupación, factores que influyen directamente en la probabilidad de impacto y en la magnitud de las consecuencias potenciales.

La clasificación cualitativa del riesgo —generalmente expresada en categorías como bajo, moderado, alto o crítico— debe sustentarse en un juicio técnico debidamente fundamentado y documentado, siguiendo criterios compatibles con el modelo propuesto por la International Society of Arboriculture (Dunster et al., 2017).

Esta clasificación permite orientar la prioridad de intervención, optimizar la asignación de recursos municipales y fortalecer la coherencia técnica en la toma de decisiones.

5.7.5 Fase 5: recomendación técnica y documentación

La fase de recomendación técnica y documentación constituye el cierre del proceso de evaluación, en el que se definen las acciones a seguir en función del análisis previo. Estas decisiones pueden incluir desde el monitoreo periódico hasta intervenciones específicas como la poda correctiva selectiva, la instalación de sistemas de soporte estructural o, en casos justificados, la remoción del individuo.

En todos los casos, la recomendación debe estar sustentada en la valoración integral del riesgo y quedar formalmente registrada en un expediente técnico. Cuando la intervención implique poda significativa o tala, se deberá gestionar la autorización correspondiente ante la autoridad ambiental competente, en cumplimiento de la normativa vigente.

La documentación asociada debe incluir el registro fotográfico del individuo evaluado, la descripción técnica del diagnóstico y la justificación de la decisión adoptada. Este procedimiento no solo respalda técnicamente las acciones realizadas, sino que también fortalece la transparencia institucional y contribuye a reducir la variabilidad entre evaluadores, tal como ha sido señalado en la literatura especializada reciente.

5.7.6 Monitoreo y reevaluación periódica

El riesgo arbóreo es dinámico. Las condiciones estructurales y sanitarias pueden modificarse con el tiempo debido a crecimiento, eventos climáticos extremos o intervenciones humanas. Por ello, el procedimiento aplicado en la Ciudad de Panamá debe incluir un programa de monitoreo periódico para ejemplares clasificados como riesgo moderado o alto.

La reevaluación permite ajustar decisiones conforme cambian las condiciones estructurales o ambientales, consolidando un modelo de gestión preventiva y no reactiva.

El procedimiento aplicado en la Ciudad de Panamá integra estándares internacionales de evaluación del riesgo con variables climáticas, urbanas e institucionales propias del contexto local. Su implementación sistemática permite reducir decisiones arbitrarias, priorizar intervenciones de alto impacto, optimizar recursos municipales y fortalecer la gobernanza ambiental.

5.8 Matriz semicuantitativa de evaluación del riesgo arbóreo

La evaluación cualitativa del riesgo, aunque ampliamente utilizada en arboricultura profesional, puede fortalecerse mediante la incorporación de una matriz semicuantitativa que permita estructurar el juicio técnico y reducir la variabilidad interevaluador (Koeser et al., 2020). La ISA promueve un enfoque basado en la combinación de probabilidad de falla, probabilidad de impacto y severidad de consecuencia; ese mismo principio continúa siendo la base de sus materiales TRAQ y de sus publicaciones 2025.

Con base en dicho modelo, se propone la siguiente adaptación operativa para la Ciudad de Panamá, considerando variables climáticas tropicales, densificación urbana y exposición estacional.

5.8.1 Dimensión 1: Probabilidad de falla estructural (PF)

La probabilidad de falla estructural (PF) se define como la estimación de la posibilidad de que un árbol o parte de este experimente una falla bajo las condiciones actuales. Esta dimensión se clasifica en cuatro niveles que reflejan el grado de compromiso estructural del individuo, considerando la presencia, magnitud y evolución de los defectos observados.

El nivel bajo corresponde a árboles que presentan defectos menores sin pérdida significativa de sección resistente, sin evidencia de inclinación progresiva ni signos de deterioro activo, lo que indica una condición estructural estable. El nivel moderado incluye individuos con defectos estructurales localizados y una pérdida parcial de sección resistente inferior al 30 %, generalmente acompañada de inclinaciones leves que se mantienen estables en el tiempo.

El nivel alto se asocia a la presencia de cavidades significativas o a una pérdida de sección resistente comprendida entre el 30 % y el 50 %, así como a uniones codominantes con grietas activas o a la afectación de raíces estructurales, condiciones que incrementan la probabilidad de falla bajo cargas dinámicas. Finalmente, el nivel muy alto corresponde a árboles con pérdida superior al 50 % de la sección resistente, grietas abiertas activas, levantamiento del suelo o inclinación progresiva, especialmente posterior a eventos de lluvia, lo que indica una condición crítica de estabilidad.

5.8.2 Dimensión 2: Probabilidad de impacto (PI)

La probabilidad de impacto (PI) se refiere a la posibilidad de que una diana se encuentre presente dentro del área potencial de caída en el momento en que ocurre una falla estructural. Esta dimensión está directamente asociada al nivel de ocupación y al uso del espacio urbano, por lo que constituye un componente esencial en la estimación del riesgo.

El nivel muy bajo corresponde a áreas sin ocupación permanente, donde la presencia de personas o bienes es prácticamente inexistente. El nivel bajo se asocia a espacios con uso ocasional o con una frecuencia peatonal reducida, lo que limita la probabilidad de impacto. El nivel moderado incluye zonas con tránsito peatonal regular o con presencia frecuente de vehículos, en las que la probabilidad de interacción con una falla estructural es mayor. Finalmente, el nivel alto se presenta en áreas de alta concentración de personas o bienes, como centros educativos, hospitales, vías principales o zonas con infraestructura crítica, donde la probabilidad de impacto es significativa.

5.8.3 Dimensión 3: Severidad de consecuencia (SC)

La severidad de la consecuencia (SC) representa la magnitud del daño potencial asociado a una falla estructural, considerando tanto el tipo de diana como la naturaleza del impacto. Esta dimensión permite diferenciar entre eventos de baja relevancia y aquellos con consecuencias críticas para la seguridad pública.

En términos operativos, la severidad puede variar desde daños limitados a vegetación o mobiliario menor, hasta escenarios con alta probabilidad de lesiones graves o fatalidades. La graduación de esta dimensión permite incorporar el impacto potencial dentro del análisis integral del riesgo, complementando la probabilidad de falla estructural y la probabilidad de impacto.

Como se observa en la Figura 5.6, la clasificación final del riesgo emerge de la combinación de estas dimensiones, configurando un modelo integrador que permite interpretar el riesgo como resultado de múltiples factores interrelacionados.

Figura 5.6

Modelo integrador semicuantitativo de evaluación proporcional del riesgo arbóreo urbano.



Nota. El esquema representa la integración entre condición estructural del árbol, estado sanitario, factores ambientales y grado de exposición urbana, articulados mediante el índice de riesgo (IR = PF × PI × SC). Este enfoque es consistente con el modelo de

evaluación proporcional del riesgo propuesto por la International Society of Arboriculture (Dunster et al., 2017; Smiley et al., 2017), adaptado al contexto urbano tropical.

La integración de estas tres dimensiones puede representarse mediante una relación conceptual simplificada entre probabilidad de falla, probabilidad de impacto y severidad de consecuencia, lo que permite estructurar el análisis del riesgo de forma sistemática y coherente.

Tras la representación conceptual del modelo, resulta necesario operacionalizar sus componentes mediante un instrumento que permita estandarizar la valoración del riesgo en campo. La traducción del enfoque conceptual a un esquema aplicable requiere definir niveles explícitos para cada dimensión, de manera que el juicio técnico se apoye en criterios verificables y comparables.

En este sentido, como se presenta en la Tabla 5.1, se propone una matriz semicuantitativa que permite integrar las dimensiones de probabilidad de falla, probabilidad de impacto y severidad de consecuencia dentro de un esquema operativo para la toma de decisiones.

Tabla 5.1

Matriz semicuantitativa de evaluación del riesgo arbóreo adaptada al contexto urbano tropical de la Ciudad de Panamá

Dimensión	**Nivel 1**	**Nivel 2**	**Nivel 3**	**Nivel 4**
Probabilidad de falla (**PF**)	Defectos menores sin pérdida significativa de sección resistente. Sin inclinación progresiva.	Defectos localizados. Pérdida <30 % de sección resistente. Inclinación leve estable.	Cavidades relevantes o pérdida 30–50 %. Uniones codominantes activas. Raíces parcialmente comprometidas.	Pérdida >50 % de sección resistente. Grietas abiertas activas. Levantamiento del suelo.

Dimensión	**Nivel 1**	**Nivel 2**	**Nivel 3**	**Nivel 4**
				Inclinación progresiva.
Probabilidad de impacto (**PI**)	Área sin ocupación permanente.	Uso ocasional o baja frecuencia peatonal.	Tránsito regular peatonal o presencia frecuente de vehículos.	Escuelas, hospitales, vías principales o infraestructura crítica.
Severidad de consecuencia (**SC**)	Daño limitado a vegetación o mobiliario menor.	Daño material sin afectación humana.	Posible lesión humana o daño estructural significativo.	Alta probabilidad de lesión grave o fatalidad.

Como se presenta en la Tabla 5.1, la integración de las dimensiones de probabilidad de falla, probabilidad de impacto y severidad de consecuencia permite calcular un índice de riesgo (IR), el cual constituye una herramienta operativa para la toma de decisiones en campo.

El índice de riesgo se obtiene mediante la multiplicación de las tres dimensiones evaluadas, generando valores dentro de un rango de 1 a 64. Este resultado permite clasificar el riesgo en categorías operativas que orientan la intervención técnica de manera proporcional.

La clasificación presentada en la Tabla 5.2 permite traducir el análisis técnico en acciones concretas de manejo, facilitando la priorización de intervenciones en función del nivel de riesgo identificado.

Tabla 5.2

Clasificación del índice de riesgo y recomendaciones técnicas

Índice de Riesgo (IR)	**Clasificación**	**Recomendación técnica**
1–8	Riesgo bajo	Monitoreo periódico documentado.
9–24	Riesgo moderado	Intervención correctiva selectiva o reducción estructural.
25–48	Riesgo alto	Mitigación prioritaria con plan de acción definido.
49–64	Riesgo crítico	Intervención inmediata o remoción técnicamente justificada.

Como complemento a este esquema, la matriz semicuantitativa se fundamenta en el enfoque proporcional de evaluación del riesgo promovido por la International Society of Arboriculture, integrando principios de biomecánica vegetal, pérdida de sección resistente y comportamiento estructural bajo cargas dinámicas, adaptados al contexto climático tropical de la Ciudad de Panamá.

Durante la temporada lluviosa, especialmente en condiciones de saturación persistente del suelo o ante evidencias de inclinación progresiva, se recomienda ajustar la valoración incrementando en un nivel la probabilidad de falla. Este criterio responde a la reducción temporal de la resistencia raíz–suelo descrita en la literatura biomecánica, lo cual modifica significativamente la estabilidad estructural del árbol.

Es importante destacar que la evaluación del riesgo arbóreo no constituye una predicción absoluta de falla, sino una estimación estructurada de escenarios

probables bajo condiciones específicas. Esta distinción resulta fundamental para evitar interpretaciones erróneas y para comunicar adecuadamente el carácter probabilístico del análisis técnico. Este enfoque es consistente con los principios establecidos en ISO 31000:2018, que conciben la gestión del riesgo como un proceso continuo de identificación, análisis, evaluación, tratamiento, monitoreo y comunicación.

La adopción de estándares internacionales fortalece la coherencia conceptual entre el diagnóstico, la documentación y la recomendación de manejo del arbolado urbano. Si bien la formalización metodológica no elimina la variabilidad inherente a los sistemas biológicos, sí establece un marco transparente que articula la evaluación técnica con la intervención proporcional y la gobernanza municipal, contribuyendo a la consistencia en la toma de decisiones.

La evaluación y diagnóstico del riesgo arbóreo constituye un proceso técnico integral que trasciende la simple identificación de defectos visibles. El riesgo no debe entenderse como una condición inherente al árbol, sino como el resultado de la interacción entre su condición estructural y sanitaria, la dinámica ambiental y el grado de exposición urbana. Esta comprensión sistémica permite superar enfoques reduccionistas basados en percepciones subjetivas y consolidar una práctica profesional sustentada en evidencia científica.

El reconocimiento del árbol como sistema biológico estructural implica considerar la integración funcional entre raíces, fuste y copa, así como su capacidad adaptativa frente a cargas dinámicas y condiciones de estrés ambiental (Niklas, 1992; Peltola, 2006). En este sentido, la presencia de defectos no determina por sí sola la necesidad de remoción, sino que debe evaluarse en función de la pérdida efectiva de sección resistente, la probabilidad de falla y el contexto de exposición. El modelo de evaluación proporcional promovido por la International Society of Arboriculture proporciona un marco metodológico coherente para la toma de decisiones fundamentadas (Dunster et al., 2017).

Asimismo, el diagnóstico sanitario se integra al análisis estructural al reconocer que los procesos de deterioro interno pueden modificar progresivamente la resistencia mecánica del tejido leñoso. La capacidad de compartimentación descrita por Shigo (1984) explica la respuesta defensiva del árbol, pero también evidencia sus límites frente a daños severos o intervenciones inadecuadas. A ello se suman los conflictos árbol–infraestructura y las alteraciones de origen antrópico, que actúan como factores que incrementan tanto la probabilidad de falla como la severidad de las consecuencias.

La evaluación del riesgo arbóreo en la Ciudad de Panamá debe considerar las condiciones climáticas propias de la región, caracterizadas por la estacionalidad de las lluvias, la saturación temporal de los suelos y la ocurrencia de eventos convectivos intensos. Estas condiciones influyen directamente en el comportamiento mecánico del arbolado, haciendo que su estabilidad estructural sea una variable dinámica. En consecuencia, se requiere monitoreo periódico y actualización continua del diagnóstico en función de los cambios ambientales y urbanos.

Desde el ámbito institucional, la adopción de un modelo estructurado permite fortalecer la gestión del arbolado urbano al proporcionar criterios técnicos transparentes y documentables. La trazabilidad no solo mejora la calidad del manejo, sino que también refuerza la legitimidad de las decisiones frente a la ciudadanía y las autoridades regulatorias.

La gestión del arbolado urbano en la Ciudad de Panamá debe sustentarse en un enfoque metodológico que integre de manera sistemática la observación estructurada, el diagnóstico biomecánico y sanitario, la valoración proporcional del riesgo y la toma de decisiones debidamente documentadas. Esta articulación constituye el núcleo técnico de la arboricultura urbana contemporánea, al permitir intervenciones fundamentadas en criterios científicos, coherentes y verificables.

10.69821/978-628-97750-2-0

Bajo este enfoque, el riesgo arbóreo deja de interpretarse como una percepción subjetiva de peligro y pasa a entenderse como el resultado de interacciones complejas entre el árbol, el ambiente y el entorno urbano. Esta perspectiva proporciona una base sólida para el desarrollo de estrategias de gestión orientadas simultáneamente a la prevención del riesgo, la conservación del patrimonio arbóreo y la planificación sostenible de la infraestructura verde urbana.

10.69821/978-628-97750-2-0

CAPÍTULO VI

PLANIFICACIÓN, GOBERNANZA Y NORMATIVA MUNICIPAL

La gestión del arbolado urbano trasciende el ámbito técnico-operativo y se inscribe dentro de un marco institucional que articula planificación territorial, normativa ambiental y toma de decisiones públicas. La planificación y gobernanza del arbolado urbano constituyen componentes esenciales para garantizar su sostenibilidad, funcionalidad y coherencia dentro del sistema de infraestructura verde.

El arbolado urbano no debe entenderse como un conjunto aislado de individuos, sino como un sistema planificado cuya distribución, composición y manejo responden a objetivos ambientales, sociales y urbanos. Este enfoque permite integrar los árboles dentro de estrategias más amplias de desarrollo urbano sostenible, optimizando sus beneficios ecosistémicos y reduciendo conflictos con la infraestructura.

6.1 Gobernanza del arbolado urbano en ciudades tropicales

La gestión del arbolado urbano constituye un componente fundamental de los sistemas de infraestructura verde que estructuran el funcionamiento ecológico de las ciudades contemporáneas. En entornos urbanos caracterizados por altas temperaturas y elevada humedad relativa, los árboles desempeñan funciones ecosistémicas clave relacionadas con la regulación microclimática, la mitigación del efecto de isla de calor, la captura de

carbono atmosférico, la filtración de contaminantes del aire y la mejora del bienestar psicológico de la población urbana (Nowak & Dwyer, 2007; Roy, Byrne & Pickering, 2012).

El manejo institucional del arbolado urbano puede definirse como el conjunto de estructuras organizativas, instrumentos normativos y mecanismos de gestión

mediante los cuales las autoridades regulan, planifican y administran los árboles presentes en el espacio urbano (Konijnendijk et al., 2005). Este enfoque reconoce que su manejo no puede limitarse a intervenciones operativas como la poda o la tala, sino que debe integrarse dentro de estrategias más amplias de planificación territorial, infraestructura verde y sostenibilidad urbana.

Este ámbito de gestión adquiere una complejidad adicional debido a factores climáticos y ecológicos particulares, tales como altas tasas de crecimiento vegetal, elevada precipitación anual, saturación periódica de los suelos y ocurrencia de eventos meteorológicos intensos. Estas condiciones influyen directamente en la estabilidad estructural de los árboles y en su interacción con la infraestructura urbana, lo que exige marcos institucionales capaces de integrar conocimientos de arboricultura, planificación urbana y gestión del riesgo (Pretzsch, 2014).

El arbolado urbano debe entenderse como parte de un sistema socioecológico complejo en el que interactúan factores ecológicos, sociales e institucionales. Su adecuada administración depende de la coordinación entre instituciones públicas, la aplicación de criterios técnicos de arboricultura y la

6.2 Marco normativo del arbolado urbano en Panamá

El manejo del arbolado urbano en Panamá se encuentra regulado por un conjunto de instrumentos jurídicos que establecen las bases institucionales para la conservación, manejo y aprovechamiento de los recursos forestales dentro del territorio nacional.

La legislación forestal panameña se fundamenta en la Ley 1 de 3 de febrero de 1994, la cual establece el marco general para la protección y aprovechamiento sostenible de los recursos forestales del país. Esta normativa reconoce que los bosques y árboles forman parte del patrimonio natural de la nación y establece la responsabilidad del Estado en su conservación y manejo racional (Asamblea Legislativa de la República de Panamá, 1994).

Posteriormente, la Ley 8 de 25 de marzo de 2015, mediante la cual se crea el Ministerio de Ambiente, consolidó la institucionalidad ambiental del país al establecer una entidad rectora encargada de formular, coordinar y ejecutar la política ambiental nacional. Esta ley otorga al Ministerio de Ambiente de Panamá la responsabilidad de emitir regulaciones técnicas y administrativas orientadas a la protección, conservación y manejo sostenible de los recursos naturales renovables (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2015).

En el marco de estas competencias, el Ministerio de Ambiente ha emitido regulaciones específicas relacionadas con la intervención sobre árboles dentro del territorio nacional. La Resolución DM-0055-2020 faculta a las agencias regionales del Ministerio de Ambiente para autorizar la tala o poda de árboles y arbustos en situaciones específicas, tales como problemas fitosanitarios, afectaciones a infraestructuras existentes o riesgos inminentes para la seguridad pública (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2020).

Asimismo, la normativa ambiental establece procedimientos técnicos para las intervenciones sobre árboles ubicados cerca de infraestructuras críticas. La Resolución DM-0103-2022 define los requisitos que deben cumplir las empresas responsables del mantenimiento de redes eléctricas para solicitar permisos de poda o tala de árboles cercanos a líneas de transmisión o distribución eléctrica. Esta resolución exige la presentación de información técnica detallada sobre las especies arbóreas, su localización y el volumen estimado del material vegetal a intervenir, con el fin de garantizar que dichas intervenciones se realicen bajo criterios técnicos y ambientales adecuados (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2022).

A nivel local, los gobiernos municipales desempeñan un papel operativo en la administración del arbolado urbano, particularmente en lo relativo a inventarios, programas de arborización y mantenimiento en espacios públicos. En el caso del Municipio de Panamá, el Acuerdo Municipal N.º 91 de 2016 define el arbolado público como un componente del patrimonio urbano y establece lineamientos

para su manejo, incluyendo la necesidad de autorización para intervenciones que puedan afectar su integridad estructural o funcional.

Estas regulaciones buscan asegurar que las intervenciones sobre el arbolado se realicen de manera controlada y con base en criterios técnicos, evitando prácticas indiscriminadas de eliminación de árboles que puedan afectar la calidad ambiental urbana.

La gestión del arbolado urbano en Panamá se sustenta en un sistema institucional multinivel que articula instrumentos jurídicos de alcance nacional y municipal. El Ministerio de Ambiente ejerce la rectoría en materia de política ambiental y forestal, mientras que los municipios asumen competencias operativas relacionadas con la administración del arbolado presente en los espacios públicos urbanos.

Para sintetizar el marco legal que regula esta gestión, en la Tabla 6.1 se presentan los principales instrumentos jurídicos vigentes, junto con las instituciones responsables de su aplicación y su alcance en la administración del arbolado urbano.

Tabla 6.1

Marco normativo para la gestión del arbolado urbano en Panamá

Instrumento legal	**Institución responsable**	**Alcance de la normativa**	**Aplicación en el arbolado urbano**
Ley 1 de 3 de febrero de 1994 (Ley Forestal)	Estado panameño / Ministerio de Ambiente	Marco legal para la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos forestales	Establece principios de protección y manejo sostenible de los recursos forestales (Asamblea Legislativa de

Instrumento legal	**Institución responsable**	**Alcance de la normativa**	**Aplicación en el arbolado urbano**
			la República de Panamá, 1994)
Ley 8 de 25 de marzo de 2015	Ministerio de Ambiente de Panamá	Crea el Ministerio de Ambiente como entidad rectora de la política ambiental	Otorga competencias para regular la protección y manejo de los recursos naturales (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2015)
Resolución DM-0055-2020	Ministerio de Ambiente de Panamá	Regula la autorización de tala o poda de árboles	Establece procedimientos para intervenir árboles por razones fitosanitarias o de seguridad (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2020)
Resolución DM-0103-2022	Ministerio de Ambiente de Panamá	Requisitos para poda o tala de árboles cercanos a líneas eléctricas	Regula intervenciones arbóreas cerca de redes eléctricas y exige información técnica (Ministerio de Ambiente de Panamá, 2022)
Acuerdo Municipal No. 91 de 2016	Municipio de Panamá	Conservación y manejo del arbolado público	Define competencias municipales para inventarios arbóreos, arborización y permisos

Instrumento legal	Institución responsable	Alcance de la normativa	Aplicación en el arbolado urbano
			de intervención (Municipio de Panamá, 2016)

La información presentada en la **Tabla 6.1** evidencia que la gestión del arbolado urbano en Panamá se sustenta en un sistema institucional multinivel que combina instrumentos jurídicos nacionales y municipales. Mientras el Ministerio de Ambiente ejerce la rectoría en materia de política ambiental y forestal, los municipios poseen competencias operativas para la administración del arbolado urbano presente en espacios públicos. Esta articulación institucional permite integrar los objetivos de conservación ambiental con las necesidades de planificación urbana y gestión territorial (Konijnendijk et al., 2005; FAO, 2016).

6.3 Competencias municipales en la gestión del arbolado urbano

Los gobiernos municipales desempeñan un papel fundamental en la gestión del arbolado urbano debido a su responsabilidad directa sobre los espacios públicos urbanos, incluyendo parques, avenidas, plazas, áreas verdes y otros bienes de uso público.

En el caso del Distrito de Panamá, el Acuerdo Municipal N.º 91 de 2016 establece medidas específicas para la conservación, protección y manejo del arbolado público dentro del distrito. Esta normativa define el arbolado público como el conjunto de árboles y arbustos plantados en áreas verdes, parques, avenidas, jardines y demás espacios públicos bajo la administración municipal (Municipio de Panamá, 2016).

El acuerdo municipal asigna a la Dirección de Gestión Ambiental del Municipio de Panamá diversas competencias relacionadas con el manejo del arbolado urbano,

entre las que destacan la elaboración de inventarios arbóreos, la implementación de programas de arborización urbana, la evaluación técnica del estado de los árboles y la emisión de permisos para intervenciones como poda, tala o trasplante.

Asimismo, esta normativa establece mecanismos para la identificación y protección de árboles singulares o notables, reconociendo su valor histórico, cultural o ecológico dentro del paisaje urbano. La protección de estos árboles forma parte de las estrategias municipales orientadas a conservar el patrimonio natural y fortalecer la identidad ambiental de la ciudad.

6.4 Instrumentos de planificación del arbolado urbano

La gestión moderna del arbolado urbano requiere la implementación de instrumentos técnicos que permitan planificar su manejo a largo plazo. Entre los principales instrumentos utilizados en arboricultura urbana se encuentran los inventarios arbóreos, los planes de arborización urbana y los sistemas de evaluación del riesgo arbóreo.

Los inventarios arbóreos urbanos constituyen herramientas fundamentales para la planificación del arbolado urbano, ya que permiten registrar información detallada sobre la ubicación de los árboles, las especies presentes, sus dimensiones, su estado sanitario y su estabilidad estructural. Esta información permite a las autoridades municipales planificar programas de mantenimiento, identificar árboles en riesgo y diseñar estrategias de expansión de la cobertura arbórea urbana (McPherson et al., 2011).

Los planes de arborización urbana constituyen instrumentos estratégicos orientados a incrementar la cobertura vegetal en las ciudades y mejorar la distribución espacial del arbolado urbano. Estos planes deben considerar variables ecológicas, urbanísticas y sociales, incluyendo la disponibilidad de espacio radicular, la interacción con infraestructuras urbanas y la resiliencia climática de las especies seleccionadas (FAO, 2016).

Otro instrumento fundamental en la gestión del arbolado urbano es el sistema de evaluación del riesgo arbóreo, el cual permite identificar árboles que presentan defectos estructurales o condiciones sanitarias que puedan representar un peligro para las personas o para la infraestructura urbana. Estas evaluaciones se basan en metodologías de arboricultura profesional que analizan factores como la estabilidad del árbol, la presencia de cavidades o pudriciones internas y la exposición a áreas de tránsito o edificaciones (Smiley et al., 2017).

6.5 Coordinación interinstitucional

El manejo del arbolado urbano requiere la coordinación entre múltiples actores institucionales cuyas competencias se superponen dentro del territorio urbano. En Panamá, este proceso involucra la interacción entre el Ministerio de Ambiente, los gobiernos municipales, las empresas de servicios públicos, las autoridades de planificación territorial y las entidades responsables de la gestión del riesgo.

La coordinación interinstitucional resulta particularmente importante en situaciones donde el crecimiento de los árboles puede interferir con infraestructuras críticas, como redes eléctricas, sistemas de telecomunicaciones o vías de transporte. En estos casos, las intervenciones sobre el arbolado deben realizarse bajo protocolos técnicos que garanticen tanto la seguridad pública como la conservación del patrimonio arbóreo urbano.

La literatura internacional señala que la coordinación institucional constituye uno de los factores determinantes para el éxito de los programas de arborización urbana, ya que permite integrar los objetivos de conservación ambiental con las necesidades de desarrollo urbano y mantenimiento de infraestructuras (Konijnendijk et al., 2005).

6.6 Participación ciudadana en la gestión del arbolado urbano

La participación ciudadana constituye un elemento fundamental dentro de los sistemas de gobernanza ambiental urbana. La percepción social del valor de los árboles urbanos influye directamente en la conservación del arbolado y en el éxito

de las políticas públicas orientadas a la protección de los espacios verdes urbanos.

Diversos estudios han demostrado que las ciudades que promueven programas de participación comunitaria en arborización urbana presentan mayores niveles de conservación del arbolado y una mayor aceptación social de las intervenciones necesarias para su manejo (Roy et al., 2012).

Las estrategias de participación ciudadana pueden incluir programas de educación ambiental, jornadas de plantación comunitaria, programas escolares de arborización y mecanismos de denuncia ciudadana frente a intervenciones ilegales sobre árboles. Estas iniciativas contribuyen a fortalecer la cultura ambiental urbana y a fomentar una mayor responsabilidad colectiva en la protección del patrimonio arbóreo.

6.7 Síntesis institucional de la gestión del arbolado urbano

La gestión del arbolado urbano en la Ciudad de Panamá requiere un enfoque institucional integrado que articule gobernanza ambiental, planificación territorial y participación ciudadana. La existencia de un marco normativo nacional y municipal proporciona las bases legales para la protección y manejo del arbolado urbano; sin embargo, su eficacia depende de la capacidad de las instituciones para aplicar estos instrumentos mediante criterios técnicos de arboricultura y planificación urbana.

La articulación entre políticas ambientales, competencias municipales e instrumentos de planificación permite desarrollar estrategias de gestión orientadas simultáneamente a la seguridad urbana, la conservación del patrimonio arbóreo y la mejora de la calidad ambiental de la ciudad. En este sentido, la gobernanza del arbolado urbano se consolida como un elemento clave dentro de la infraestructura verde urbana y como un componente estratégico para la construcción de ciudades más resilientes, sostenibles y ambientalmente equilibradas.

La estructura institucional que sustenta la gestión del arbolado urbano en la Ciudad de Panamá puede sintetizarse en el modelo conceptual presentado en la Figura 6.1. Este esquema ilustra la interacción entre las principales entidades responsables de la planificación, regulación y manejo del arbolado urbano, destacando el papel del Municipio de Panamá en la gestión operativa del arbolado público, la función normativa y de supervisión del Ministerio de Ambiente, la participación de las empresas de servicios públicos en el mantenimiento de infraestructuras urbanas y el rol de la ciudadanía en la conservación y vigilancia del patrimonio arbóreo. La coordinación entre estos actores resulta esencial para garantizar una gestión eficiente, segura y sostenible del arbolado urbano dentro del sistema de infraestructura verde de la ciudad.

Figura 6.1

Modelo de gobernanza del arbolado urbano en la Ciudad de Panamá



Nota. El esquema representa la interacción institucional entre el Municipio de Panamá, el Ministerio de Ambiente, las empresas de servicios públicos y la ciudadanía en la gestión del arbolado urbano, destacando la importancia de la coordinación interinstitucional para la planificación urbana, la gestión del riesgo y la conservación del patrimonio arbóreo urbano (Konijnendijk et al., 2005; FAO, 2016; Roy et al., 2012).

Tras comprender la estructura institucional que sustenta la gobernanza del arbolado urbano, resulta necesario considerar los instrumentos técnicos que permiten operacionalizar dicha gestión en el territorio. La planificación efectiva del arbolado urbano requiere herramientas que faciliten la toma de decisiones basadas en información técnica, el monitoreo del estado del arbolado y la priorización de intervenciones de manejo. En este sentido, los inventarios arbóreos, los planes de arborización urbana y los sistemas de evaluación del riesgo constituyen instrumentos fundamentales para la gestión moderna del arbolado urbano. Como se muestra en la Figura 6.2, estos instrumentos funcionan de manera complementaria dentro del sistema de planificación urbana, permitiendo integrar el diagnóstico técnico del arbolado con las estrategias de expansión de la infraestructura verde y la gestión preventiva del riesgo.

Figura 6.2

Principales instrumentos técnicos para la planificación del arbolado urbano



Nota. El esquema muestra los instrumentos técnicos utilizados en la planificación y gestión del arbolado urbano, incluyendo los inventarios arbóreos, los planes de arborización urbana y los sistemas de evaluación del riesgo arbóreo. Estas herramientas permiten a las autoridades municipales planificar el mantenimiento del arbolado,

priorizar intervenciones y fortalecer la gestión de la infraestructura verde urbana (McPherson et al., 2011; FAO, 2016; Smiley et al., 2017).

La gestión del arbolado urbano en la Ciudad de Panamá requiere un marco institucional sólido que articule instrumentos normativos, capacidades técnicas y mecanismos efectivos de coordinación interinstitucional. A lo largo de este capítulo se ha evidenciado que su manejo no se limita a la ejecución de intervenciones operativas, sino que implica la integración de políticas públicas, planificación urbana y gestión ambiental dentro de un sistema de infraestructura verde orientado al bienestar de la población y a la sostenibilidad urbana.

El marco normativo vigente en Panamá establece las bases jurídicas para la protección y manejo del arbolado, definiendo competencias diferenciadas entre el Ministerio de Ambiente y los gobiernos municipales. Esta estructura institucional permite articular la regulación ambiental con la gestión territorial, facilitando la implementación de programas de arborización, inventarios arbóreos y mecanismos de control sobre las intervenciones en espacios públicos.

La incorporación de instrumentos técnicos de planificación, como los inventarios arbóreos urbanos, los planes de arborización y los sistemas de evaluación del riesgo, constituye un elemento esencial para fortalecer la toma de decisiones basada en evidencia. Estas herramientas permiten identificar prioridades de manejo, anticipar riesgos derivados de la interacción entre árboles e infraestructura urbana y orientar la expansión de la cobertura arbórea bajo criterios de resiliencia climática y sostenibilidad.

La coordinación entre instituciones públicas, empresas de servicios y ciudadanía representa un componente fundamental en la gestión del patrimonio arbóreo urbano. La eficacia de este proceso depende de mecanismos de cooperación que permitan conciliar la conservación ambiental con las dinámicas del desarrollo urbano y el mantenimiento de infraestructuras críticas. La participación ciudadana y los programas de educación ambiental contribuyen, además, a

fortalecer la valoración social de los árboles y a consolidar una cultura de corresponsabilidad en su protección.

Los elementos analizados evidencian que la planificación y administración del arbolado urbano constituyen pilares fundamentales para la gestión sostenible de la infraestructura verde. La articulación entre normativa, planificación técnica y participación social permite establecer un sistema coherente que garantice la conservación del patrimonio arbóreo y la reducción de riesgos asociados a su interacción con el entorno construido.

Este marco institucional y metodológico proporciona la base para el desarrollo de estrategias operativas de manejo, las cuales serán abordadas en el capítulo siguiente mediante el análisis de herramientas técnicas orientadas al mantenimiento, monitoreo y gestión integral del arbolado en el espacio urbano.

10.69821/978-628-97750-2-0

CAPÍTULO VIII

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y BENEFICIOS DEL ARBOLADO URBANO

El arbolado urbano constituye un componente fundamental de la infraestructura verde al proveer servicios ecosistémicos que inciden directamente en el funcionamiento ambiental, social y económico de las ciudades. Estos servicios emergen de procesos biológicos y ecológicos que, al interactuar con el entorno urbano, generan beneficios medibles para la población y el sistema territorial.

El enfoque de servicios ecosistémicos permite traducir las funciones ecológicas del arbolado en términos técnicos que facilitan su integración dentro de la planificación urbana y la toma de decisiones públicas. Este marco conceptual reconoce que los árboles urbanos no son únicamente elementos paisajísticos, sino componentes estructurales capaces de regular procesos climáticos, hidrológicos, atmosféricos y sociales (Nowak & Dwyer, 2007; FAO, 2016).

La provisión de estos servicios depende de variables como la especie, el tamaño del árbol, la densidad del dosel, las condiciones del sitio y la distribución espacial del arbolado. En consecuencia, la planificación estratégica del arbolado urbano resulta determinante para maximizar sus beneficios y reducir limitaciones funcionales.

8.1 Marco conceptual de servicios ecosistémicos urbanos

El concepto de servicios ecosistémicos surge como una herramienta analítica orientada a comprender y valorar las contribuciones de los ecosistemas al bienestar humano. El Millennium Ecosystem Assessment (2005) consolidó este enfoque al definirlos como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, clasificándolos en servicios de provisión, regulación, culturales y de soporte. Aunque originalmente desarrollado en ecosistemas naturales, este marco

ha sido progresivamente adaptado al entorno urbano, donde los sistemas ecológicos interactúan con infraestructuras construidas y dinámicas socioeconómicas complejas.

En las ciudades, el arbolado urbano constituye una de las unidades funcionales más relevantes dentro de la provisión de servicios ecosistémicos. Su longevidad, estructura vertical compleja y capacidad de interacción simultánea con la atmósfera, el suelo y el sistema hídrico lo posicionan como un componente central de la infraestructura verde urbana. Esta multifuncionalidad adquiere especial relevancia en regiones tropicales, donde los árboles contribuyen de manera significativa a la regulación microclimática y al confort térmico (FAO, 2022; Jim, 2017).

La clasificación tradicional de los servicios ecosistémicos es aplicable al arbolado urbano con adaptaciones específicas. Los servicios de provisión incluyen productos tangibles como frutos y biomasa, aunque en el entorno urbano su importancia es secundaria frente a los servicios de regulación. Estos comprenden la mitigación térmica, la captura de carbono, la filtración de contaminantes atmosféricos, la regulación de la escorrentía y la estabilización del suelo, funciones que adquieren mayor relevancia bajo condiciones climáticas exigentes.

Los servicios culturales representan una dimensión clave en el contexto urbano. La presencia de árboles incide en la percepción del paisaje, el bienestar psicológico y la cohesión social. La evidencia científica ha demostrado que el acceso a espacios verdes se asocia con mejoras en la salud mental, reducción del estrés y mayor calidad de vida (Bratman et al., 2019). En entornos densamente urbanizados, esta función trasciende la estética y se vincula directamente con la salud pública.

El marco conceptual de los servicios ecosistémicos ha sido ampliado por la Plataforma Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES, 2019), mediante el concepto de contribuciones de la naturaleza a las personas. Este enfoque integra dimensiones sociales, culturales y económicas en

la valoración de la naturaleza, lo que resulta especialmente pertinente en el análisis del arbolado urbano, cuya funcionalidad no puede limitarse a indicadores biofísicos.

El arbolado urbano también cumple funciones de soporte ecológico, como la provisión de hábitat y el mantenimiento de procesos biogeoquímicos. Aunque estos servicios no generan beneficios directos inmediatos, sostienen la funcionalidad ecológica del sistema urbano y permiten la provisión de otros servicios ecosistémicos. La biodiversidad urbana depende en gran medida de la estructura arbórea y de la conectividad ecológica del paisaje (Aronson et al., 2017).

La integración de estos procesos se sintetiza en la Figura 8.1, donde se representan las principales funciones ecosistémicas del arbolado urbano en ciudades tropicales, destacando su papel en la regulación climática, la calidad del aire, la dinámica hídrica, el soporte de biodiversidad y el bienestar humano.

Figura 8.1.

Servicios ecosistémicos del arbolado urbano.



Nota: Elarbolado contribuye a la regulación del microclima, la mejora de la calidad del aire, la infiltración hídrica, el soporte de biodiversidad y el bienestar humano,

consolidándose como componente estructural de la infraestructura verde urbana (FAO, 2022; Livesley et al., 2016; Nowak et al., 2014).

La infraestructura verde urbana debe planificarse como una red interconectada y no como un conjunto de elementos aislados (European Commission, 2013). Bajo este enfoque, el arbolado urbano deja de ser un conjunto de individuos dispersos para integrarse en un sistema ecológico que amplifica sus beneficios mediante la conectividad espacial, la diversidad estructural y la distribución estratégica.

La provisión de servicios ecosistémicos no es estática. La capacidad funcional del arbolado depende de factores como la especie, la edad, el estado sanitario y las condiciones del entorno urbano. En consecuencia, la planificación, el monitoreo y el manejo influyen directamente en la magnitud de los beneficios generados. Árboles sometidos a condiciones de estrés o gestionados de manera inadecuada presentan una reducción significativa en su funcionalidad.

En América Latina, el arbolado urbano desempeña un papel relevante en la regulación microclimática, la reducción de contaminantes atmosféricos y la mejora del bienestar urbano (Escobedo et al., 2015; Nowak et al., 2014). Estos patrones se manifiestan de manera diferenciada según las condiciones locales de cada ciudad. En este sentido, la Ciudad de Panamá constituye un caso representativo de entorno urbano tropical, donde la intensidad climática y la dinámica de crecimiento urbano permiten evidenciar de forma clara la funcionalidad del arbolado urbano.

Bajo esta perspectiva multiescalar, la Tabla 8.1 presenta ejemplos aplicados al contexto panameño, ilustrando la expresión local de los servicios ecosistémicos descritos a escala regional.

10.69821/978-628-97750-2-0

Tabla 8.1.

Expresión local de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Ciudad de Panamá en el contexto de América Latina

Servicio ecosistémico	**Ejemplo en el contexto urbano de Panamá**	**Beneficio ambiental y social**
Regulación térmica	Árboles de gran copa en avenidas y parques urbanos que generan sombra sobre pavimentos y áreas peatonales	Reducción del efecto de isla de calor urbana y mejora del confort térmico para peatones
Regulación hídrica	Intercepción de lluvia y aumento de infiltración en suelos urbanos con presencia de arbolado	Disminución de escorrentía superficial y contribución a la gestión del drenaje pluvial urbano
Mejora de calidad del aire	Captura de partículas contaminantes en corredores viales con alto tránsito vehicular	Reducción local de contaminación atmosférica y mejora de la salud ambiental urbana
Biodiversidad urbana	Presencia de árboles que sirven como hábitat para aves, insectos polinizadores y fauna urbana	Conservación de biodiversidad urbana y fortalecimiento de la conectividad ecológica
Bienestar social	Espacios públicos arbolados que favorecen actividades recreativas y uso del espacio urbano	Mejora de la calidad de vida, reducción del estrés y fortalecimiento de la cohesión comunitaria

Nota. *Elaboración propia con base en FAO (2022), Nowak et al. (2014), Livesley et al. (2016)***.**

El arbolado urbano se posiciona como un componente central en la provisión de servicios ecosistémicos dentro del sistema urbano, incluyendo la regulación del microclima, la captura de carbono atmosférico, la retención de contaminantes y la modulación de la dinámica hídrica (Livesley et al., 2016; Nowak et al., 2014).

La efectividad del arbolado urbano como proveedor de servicios ecosistémicos no es uniforme, sino que depende de variables estructurales, espaciales y de gestión. Factores como la densidad urbana, la compactación del suelo, la selección inadecuada de especies y la ausencia de mantenimiento pueden limitar de manera significativa la provisión de estos servicios. En consecuencia, la evidencia científica indica que la simple incorporación de árboles en el entorno urbano no garantiza beneficios ecosistémicos, los cuales emergen únicamente cuando el arbolado es concebido, planificado y gestionado como un sistema funcional integrado (Livesley et al., 2016; FAO, 2022).

A partir de este marco, los principales servicios ecosistémicos asociados al arbolado urbano se desarrollan en las secciones siguientes.

8.2 Servicios de regulación climática

La regulación climática constituye uno de los servicios ecosistémicos más relevantes del arbolado urbano, particularmente en entornos tropicales donde la radiación solar intensa, la alta humedad relativa y la expansión de superficies impermeables favorecen la formación de islas de calor. Este fenómeno se origina cuando materiales como asfalto, concreto y cubiertas urbanas absorben y reemiten calor, elevando las temperaturas locales por encima de las zonas circundantes. La incorporación estratégica de cobertura arbórea permite mitigar este efecto mediante mecanismos biofísicos ampliamente documentados.

El sombreado directo representa uno de los principales mecanismos de regulación térmica. La copa intercepta la radiación solar y reduce la temperatura superficial

de pavimentos y fachadas expuestas. Estudios empíricos han demostrado reducciones significativas en superficies sombreadas en comparación con áreas sin cobertura vegetal (Bowler et al., 2010). En condiciones tropicales, este efecto adquiere especial relevancia al disminuir la acumulación térmica en el entorno urbano.

La evapotranspiración constituye un segundo mecanismo fundamental. A través de la transpiración foliar y la evaporación superficial, los árboles liberan vapor de agua, generando enfriamiento asociado al cambio de fase. Este proceso contribuye a reducir la temperatura del aire y a regular el balance energético local. La magnitud de este efecto depende de la densidad foliar, la disponibilidad hídrica y la estructura del dosel (Rahman et al., 2020).

En condiciones de alta humedad, la interacción entre evapotranspiración y humedad relativa requiere una evaluación cuidadosa. Aunque el arbolado reduce la temperatura, un incremento en la humedad puede modificar la percepción térmica. Por esta razón, la planificación urbana debe integrar criterios de ventilación, conectividad ecológica y distribución espacial del arbolado para optimizar el confort climático.

El arbolado urbano también influye en el balance energético mediante la modificación del albedo y la reducción de la acumulación de calor en superficies construidas. La presencia de vegetación disminuye la absorción de radiación por materiales urbanos y limita la transferencia de calor hacia el aire, contribuyendo indirectamente a la reducción de la demanda energética en edificaciones (Nowak et al., 2014).

El IPCC (2022) reconoce el papel de las soluciones basadas en la naturaleza, incluyendo el arbolado urbano, como estrategias de adaptación frente a eventos de calor extremo. En regiones tropicales, la mitigación térmica adquiere relevancia directa en la salud pública, al reducir la exposición a temperaturas elevadas y sus efectos asociados.

La regulación climática del arbolado también genera microclimas favorables en espacios urbanos como corredores peatonales, plazas y áreas recreativas. La mejora del confort térmico incrementa el uso del espacio público y contribuye al bienestar de la población, reforzando el carácter multifuncional de esta infraestructura verde.

La efectividad de este servicio depende de la configuración espacial del arbolado. Individuos aislados generan efectos localizados, mientras que redes conectadas de cobertura vegetal amplifican el enfriamiento urbano y favorecen la circulación del aire (FAO, 2022). Asimismo, en entornos de alta densidad edificada, la limitada ventilación puede reducir la eficiencia de la evapotranspiración, lo que evidencia la necesidad de integrar diseño urbano y vegetación de manera conjunta.

En la Ciudad de Panamá, caracterizada por un crecimiento urbano acelerado, la incorporación de criterios de regulación climática en la planificación del arbolado resulta esencial. La selección de especies con copas densas, alta capacidad de transpiración y adecuada adaptación local fortalece la capacidad reguladora del sistema urbano.

En conjunto, la regulación climática del arbolado urbano constituye un componente estructural de la resiliencia urbana. A través del sombreado, la evapotranspiración y la modificación del balance energético, los árboles contribuyen a reducir temperaturas, mejorar el confort térmico y fortalecer la adaptación frente al cambio climático.

8.3 Regulación hídrica y gestión de escorrentía

La regulación hídrica constituye uno de los servicios ecosistémicos más relevantes del arbolado urbano. En la Ciudad de Panamá, caracterizada por elevadas precipitaciones anuales y la ocurrencia de eventos convectivos intensos que concentran grandes volúmenes de lluvia en periodos cortos, la interacción entre vegetación, suelo y agua adquiere un papel estratégico. El arbolado no solo configura el paisaje urbano, sino que interviene activamente en la modulación de la escorrentía superficial, la infiltración y el balance hídrico del sistema urbano.

Uno de los mecanismos primarios de regulación hídrica es la interceptación de lluvia por la copa. Parte de la precipitación queda retenida temporalmente en hojas, ramas y fuste antes de alcanzar el suelo, reduciendo la energía cinética del impacto y disminuyendo la erosión superficial. Investigaciones han demostrado que la interceptación puede representar un porcentaje significativo de la lluvia total, dependiendo de la especie, la densidad foliar y la intensidad del evento (Xiao & McPherson, 2011). En climas tropicales, donde las lluvias suelen ser intensas, esta función contribuye a amortiguar picos de escorrentía.

El sistema radicular cumple un papel igualmente determinante. Las raíces modifican la estructura del suelo al incrementar la macroporosidad y favorecer la formación de agregados estables. Esta mejora estructural aumenta la conductividad hidráulica y facilita la infiltración del agua hacia capas profundas (Livesley et al., 2016). En entornos urbanos altamente impermeabilizados, donde el sellado superficial limita la infiltración natural, la presencia de árboles puede representar uno de los pocos mecanismos funcionales de recarga local.

La reducción de escorrentía superficial tiene implicaciones directas en la prevención de inundaciones urbanas. Estudios sobre infraestructura verde han demostrado que la incorporación estratégica de árboles y sistemas vegetados puede disminuir el volumen y la velocidad del agua que llega a sistemas de drenaje convencional (Berland et al., 2017). En ciudades con drenajes pluviales frecuentemente sobrecargados durante tormentas intensas, este servicio ecosistémico contribuye a reducir presión sobre infraestructura gris.

En la Ciudad de Panamá, donde se presentan sectores con pendientes pronunciadas y suelos susceptibles a procesos erosivos, el arbolado urbano cumple una función estabilizadora. El sistema radicular incrementa la resistencia al corte del suelo, disminuyendo la probabilidad de deslizamientos superficiales y erosión localizada. Si bien no reemplaza las medidas geotécnicas formales, su presencia aporta estabilidad superficial en áreas verdes y taludes urbanos.

La interacción árbol–suelo también influye en la calidad del agua urbana. La infiltración facilitada por el sistema radicular permite la filtración natural de contaminantes antes de que el agua alcance acuíferos o cuerpos superficiales. Este proceso contribuye a mejorar calidad del agua y a disminuir transporte de sedimentos y contaminantes asociados a escorrentía (Bonan, 2019). En ciudades tropicales con alta precipitación, esta función adquiere relevancia ambiental adicional.

La efectividad de la regulación hídrica está condicionada por la calidad estructural del sitio. La compactación del suelo urbano reduce la porosidad e impide el desarrollo radicular profundo, limitando la capacidad de infiltración (Day et al., 2010). Cuando el volumen radicular es insuficiente, la función hidrológica del arbolado se ve comprometida. En consecuencia, la planificación debe asegurar espacios de plantación adecuados y el uso de superficies permeables que permitan maximizar este servicio ecosistémico.

Es importante reconocer que el consumo hídrico del árbol también forma parte del balance. En condiciones tropicales húmedas, la evapotranspiración contribuye a la regulación térmica sin comprometer significativamente disponibilidad hídrica general; sin embargo, en periodos secos prolongados o suelos limitados, puede influir en disponibilidad local. El balance neto entre consumo y mejora de infiltración debe evaluarse según características del sitio.

La literatura reciente ha subrayado que la infraestructura verde urbana funciona de manera más eficiente cuando se implementa como red integrada y no como intervenciones aisladas (FAO, 2022). La combinación de arbolado con sistemas de bio-retención, zanjas de infiltración y pavimentos permeables amplifica el efecto regulador del agua urbana.

La regulación hídrica del arbolado urbano constituye un servicio ecosistémico esencial. Mediante la interceptación de la lluvia, la mejora de la estructura del suelo y el incremento de la infiltración, los árboles reducen la escorrentía, disminuyen el riesgo de inundación y contribuyen a la mejora de la calidad del

agua. Su incorporación estratégica en el diseño urbano fortalece la resiliencia hidrológica y consolida la infraestructura verde como un componente funcional del sistema urbano panameño.

8.4 Captura de carbono y mejora de la calidad del aire

El arbolado urbano contribuye de manera significativa a la mitigación del cambio climático y a la mejora de la calidad del aire en entornos urbanos densamente poblados. Aunque la captura de carbono en ciudades no sustituye los grandes sumideros forestales regionales, su contribución acumulativa en áreas metropolitanas representa un componente relevante dentro de estrategias de descarbonización y adaptación climática. En ciudades tropicales como la Ciudad de Panamá, donde la cobertura vegetal urbana puede desempeñar un papel estratégico en la transición hacia modelos de desarrollo bajo en emisiones, este servicio ecosistémico adquiere especial relevancia.

Desde el punto de vista biofísico, los árboles urbanos capturan dióxido de carbono atmosférico mediante fotosíntesis y lo almacenan en forma de biomasa leñosa, raíces y suelo asociado. La tasa de captura depende de la especie, la edad, el crecimiento anual y las condiciones ambientales. Nowak et al. (2014) demostraron que los bosques urbanos pueden almacenar cantidades sustanciales de carbono, particularmente cuando se gestionan bajo esquemas de mantenimiento que favorecen la longevidad y el crecimiento estructural estable. En contextos tropicales, donde el crecimiento es continuo durante gran parte del año, la fijación de carbono puede ser más sostenida que en climas templados.

Además del almacenamiento de carbono, el arbolado urbano contribuye a reducir emisiones indirectas mediante la disminución de demanda energética en edificaciones. El sombreado estratégico y la regulación térmica reducen necesidad de climatización artificial, lo que se traduce en menor consumo eléctrico y, por ende, menores emisiones asociadas a generación energética (Nowak et al., 2014). En regiones con alta dependencia de sistemas de aire acondicionado, como Panamá, esta función adquiere relevancia energética y económica.

En cuanto a la calidad del aire, la vegetación urbana desempeña un papel en la captura de partículas en suspensión y la absorción de contaminantes gaseosos. Las superficies foliares actúan como filtros naturales, reteniendo material particulado fino (PM10 y PM2.5) y facilitando su deposición. Estudios recientes han documentado que la presencia de arbolado puede contribuir a disminuir concentraciones locales de contaminantes atmosféricos, especialmente en corredores viales con alta carga vehicular (Baró et al., 2014). La efectividad de esta función depende de densidad del follaje, estructura del dosel y ventilación urbana.

Asimismo, las hojas pueden absorber gases contaminantes como dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3) y dióxido de azufre (SO_2), integrándolos en procesos metabólicos o reteniéndolos temporalmente en superficie foliar. Aunque la capacidad total de absorción varía entre especies, la presencia de cobertura vegetal contribuye a mejorar microcalidad del aire en entornos urbanos densos (Livesley et al., 2016). En ciudades tropicales con tráfico vehicular intenso y crecimiento urbano acelerado, esta función adquiere importancia sanitaria.

Sin embargo, es necesario evitar sobreestimaciones simplificadas. El impacto del arbolado urbano sobre concentraciones atmosféricas a escala metropolitana puede ser limitado si no se integra dentro de estrategias más amplias de reducción de emisiones. El IPCC (2022) subraya que las soluciones basadas en la naturaleza deben complementarse con políticas estructurales de mitigación energética. En este sentido, el arbolado urbano representa una medida complementaria, no sustitutiva.

En términos de planificación, la selección de especies influye en la eficiencia de captura y almacenamiento. Especies de crecimiento vigoroso y mayor densidad de madera tienden a acumular mayor biomasa estructural. No obstante, la estabilidad biomecánica y la longevidad deben priorizarse sobre crecimiento rápido, ya que árboles con vida útil prolongada almacenan carbono durante periodos más extensos. La mortalidad prematura reduce la eficacia del servicio.

La gestión adecuada también es determinante. Prácticas de poda excesiva o reemplazo frecuente disminuyen capacidad de almacenamiento acumulativo. La planificación basada en longevidad estructural y mantenimiento preventivo contribuye a maximizar beneficios climáticos.

Desde la perspectiva de salud pública, la mejora de calidad del aire asociada al arbolado urbano puede contribuir indirectamente a reducción de enfermedades respiratorias vinculadas a contaminación atmosférica. Aunque la magnitud de este efecto varía según contexto urbano, la evidencia científica respalda la integración de vegetación dentro de estrategias de salud ambiental urbana (Baró et al., 2014).

El arbolado urbano cumple un papel dual en la mitigación climática y la mejora de la calidad del aire. Mediante la captura de carbono, la reducción indirecta de emisiones y la filtración de contaminantes atmosféricos, contribuye a fortalecer la resiliencia ambiental de las ciudades. En la Ciudad de Panamá, su integración estratégica se consolida como una herramienta científicamente fundamentada dentro de las políticas de sostenibilidad urbana

8.5 Biodiversidad urbana y conectividad ecológica

El arbolado urbano constituye un componente estructural clave para la conservación y promoción de la biodiversidad en entornos altamente transformados. Aunque las ciudades suelen asociarse con pérdida de hábitat y fragmentación ecológica, la evidencia científica contemporánea demuestra que los sistemas verdes urbanos pueden desempeñar un papel significativo como refugios, corredores y nodos de conectividad biológica. En regiones tropicales como Panamá, donde la biodiversidad regional es excepcionalmente alta, el arbolado urbano puede funcionar como interfaz entre ecosistemas naturales y el espacio construido.

Desde el punto de vista ecológico, los árboles urbanos proporcionan hábitat para aves, insectos polinizadores, murciélagos y otros organismos. La estructura tridimensional del dosel genera microhábitats diferenciados que favorecen

diversidad funcional. Estudios recientes han documentado que la complejidad estructural de la vegetación urbana se correlaciona positivamente con riqueza de especies de aves y artrópodos (Aronson et al., 2017). En ciudades tropicales, donde la fauna es más diversa que en regiones templadas, esta relación puede ser aún más significativa.

La composición florística del arbolado influye directamente en la biodiversidad asociada. La inclusión de especies nativas favorece interacciones ecológicas coevolutivas, particularmente con insectos especializados y aves frugívoras. Investigaciones en ecología urbana han demostrado que áreas con mayor proporción de especies nativas tienden a albergar comunidades biológicas más complejas (Aronson et al., 2017). En Panamá, donde la flora autóctona presenta alto valor ecológico, la selección estratégica de especies puede potenciar servicios ecosistémicos más allá de los beneficios estructurales.

La conectividad ecológica representa otro aspecto central. La fragmentación urbana interrumpe movimientos de fauna y limita flujo génico entre poblaciones. La disposición estratégica de corredores verdes y alineaciones arbóreas puede mitigar parcialmente estos efectos al facilitar desplazamiento de especies móviles. La FAO (2022) destaca que la infraestructura verde urbana debe diseñarse como red interconectada y no como elementos aislados. La continuidad del dosel y la proximidad entre espacios verdes amplifican funcionalidad ecológica.

En el contexto tropical panameño, donde áreas protegidas y bosques periurbanos se encuentran relativamente cercanos a zonas urbanizadas, el arbolado urbano puede actuar como zona de transición ecológica. La integración de especies compatibles con ecosistemas circundantes puede favorecer conectividad funcional y reducir aislamiento biológico. Este enfoque resulta particularmente pertinente en áreas cercanas al Parque Natural Metropolitano y otras reservas adyacentes.

La biodiversidad urbana no solo aporta valor ecológico intrínseco, sino también beneficios culturales y educativos. La presencia de aves, mariposas y otros organismos incrementa percepción de naturaleza dentro de la ciudad,

fortaleciendo vínculos entre población urbana y entorno natural. Este componente sociocultural de la biodiversidad urbana ha sido reconocido como elemento clave en bienestar psicológico y cohesión social (IPBES, 2019).

No obstante, la planificación debe considerar riesgos potenciales asociados a introducción de especies exóticas invasoras. Aunque algunas especies ornamentales ofrecen ventajas estéticas o de crecimiento rápido, su comportamiento ecológico puede alterar dinámicas locales. La gestión responsable requiere evaluación previa de compatibilidad ecológica y monitoreo continuo.

Asimismo, la estructura vertical del arbolado urbano influye en diversidad. Árboles de diferentes estratos y tamaños generan mayor heterogeneidad de nichos que alineaciones monoespecíficas homogéneas. La diversidad estructural incrementa resiliencia ecológica frente a perturbaciones y enfermedades.

La literatura reciente subraya que la biodiversidad urbana contribuye a resiliencia del ecosistema urbano frente al cambio climático, al mantener funciones ecológicas como polinización y control biológico (Aronson et al., 2017). En ciudades tropicales, donde eventos extremos pueden alterar hábitats urbanos, la diversidad funcional favorece estabilidad del sistema.

El arbolado urbano cumple una función clave en la promoción de la biodiversidad y la conectividad ecológica. Su planificación estratégica permite incorporar funciones ecológicas en el espacio construido, fortaleciendo la resiliencia urbana y el vínculo entre la sociedad y la naturaleza. En la Ciudad de Panamá, este enfoque adquiere especial relevancia por su localización en una región de alta diversidad biológica y por la estrecha interacción entre ecosistemas naturales y la matriz urbana.

8.6 Beneficios sociales, salud pública y bienestar urbano

El arbolado urbano no solo cumple funciones ecológicas y climáticas, sino que constituye un componente estructural del bienestar humano en ciudades contemporáneas. La evidencia científica acumulada en las últimas dos décadas ha

demostrado que la presencia de vegetación urbana influye positivamente en la salud física, mental y social de la población. En ciudades tropicales densamente urbanizadas como la Ciudad de Panamá, donde el crecimiento inmobiliario y la presión sobre el espacio público son constantes, el arbolado adquiere un papel central como infraestructura verde al servicio de la salud colectiva.

Diversos estudios epidemiológicos han documentado asociaciones entre una mayor cobertura arbórea y la reducción de enfermedades cardiovasculares, el estrés crónico y la mortalidad prematura. La evidencia reciente indica que los barrios con mayor densidad de arbolado presentan menores tasas de enfermedades relacionadas con el calor y una mejor calidad de vida percibida (Kondo et al., 2018). Si bien estos efectos son multifactoriales, la regulación térmica, la mejora de la calidad del aire y la promoción de la actividad física interactúan de forma integrada.

El contacto visual y físico con la naturaleza urbana se asocia con disminución de estrés fisiológico. Estudios en psicología ambiental han documentado que la exposición a entornos arbolados reduce niveles de cortisol y mejora recuperación frente a fatiga mental (IPBES, 2019). En contextos urbanos tropicales donde el ruido, el tráfico y la densidad poblacional generan estímulos constantes, la presencia de arbolado puede actuar como modulador psicoambiental.

La sombra generada por árboles urbanos también incentiva movilidad activa. Corredores peatonales sombreados y parques arbolados promueven caminabilidad y uso recreativo del espacio público, contribuyendo indirectamente a prevención de enfermedades asociadas al sedentarismo. En ciudades con altas temperaturas, la ausencia de sombra puede desalentar desplazamientos a pie. Por tanto, la cobertura arbórea influye en patrones de movilidad urbana.

La infraestructura verde urbana desempeña un papel relevante en la cohesión comunitaria. Los espacios públicos arbolados se consolidan como escenarios de encuentro, interacción social y construcción de identidad colectiva. La calidad del entorno incide directamente en la percepción de seguridad y en el sentido de

pertenencia. La evidencia internacional señala que la inversión en infraestructura verde contribuye a reducir desigualdades ambientales entre barrios con diferentes niveles socioeconómicos (Jennings et al., 2019).

La distribución equitativa del arbolado constituye un componente de justicia ambiental. Diversos estudios han documentado que sectores urbanos de menores ingresos suelen presentar menor cobertura vegetal y mayor exposición a calor extremo. Integrar criterios de equidad en la planificación del arbolado urbano permite reducir vulnerabilidades socioambientales y mejorar resiliencia de comunidades históricamente subatendidas (IPCC, 2022).

En Panamá, caracterizado por contrastes marcados entre zonas de alta densidad edificada y áreas con mayor cobertura vegetal, la planificación del arbolado urbano representa una herramienta clave para equilibrar las condiciones ambientales. La incorporación de corredores verdes en sectores con menor cobertura arbórea contribuye simultáneamente a mejorar la salud pública y a fortalecer la resiliencia climática.

El arbolado urbano también posee valor cultural y educativo. La presencia de especies nativas dentro de la ciudad facilita procesos de educación ambiental y reconexión con la biodiversidad regional. En ciudades tropicales biodiversas, el arbolado urbano puede funcionar como plataforma pedagógica para comprender procesos ecológicos y promover conciencia ambiental.

No obstante, los beneficios sociales del arbolado dependen de mantenimiento adecuado y seguridad estructural. Árboles con defectos no gestionados pueden generar percepción negativa y disminuir aceptación comunitaria. Por ello, la integración entre diagnóstico técnico y planificación social resulta esencial para consolidar confianza ciudadana en programas de arborización.

El arbolado urbano constituye una infraestructura verde con efectos directos en la salud pública, la cohesión social y el bienestar psicológico. En la Ciudad de Panamá, su planificación trasciende los criterios ambientales tradicionales e

incorpora objetivos de equidad, calidad de vida y resiliencia urbana. La integración de estos beneficios dentro del diseño urbano refuerza el enfoque sistémico del arbolado como componente esencial del desarrollo sostenible.

Los servicios ecosistémicos asociados al arbolado urbano no deben interpretarse como beneficios aislados, sino como un sistema interdependiente en el que interactúan procesos climáticos, hidrológicos, ecológicos y sociales. En este marco, el arbolado funciona como una infraestructura verde multifuncional cuya efectividad depende de la articulación entre sus distintos servicios. La Figura 8.2 ilustra cómo los componentes de regulación climática, regulación hídrica, captura de carbono, biodiversidad y bienestar humano convergen en un eje común orientado a la resiliencia urbana y la calidad de vida.

10.69821/978-628-97750-2-0

CAPÍTULO IX

Especies Prioritarias para la Infraestructura Verde Urbana de Panamá

La selección de especies arbóreas para la infraestructura verde urbana se fundamenta en la integración de principios silviculturales, biomecánicos y de planificación estratégica. Este enfoque traslada los criterios de estabilidad estructural, evaluación del riesgo y funcionalidad ecológica hacia decisiones aplicadas de selección con pertinencia para la Ciudad de Panamá.

La elección de especies no puede sustentarse exclusivamente en criterios ornamentales ni en prácticas tradicionales de arborización. Factores como la elevada pluviosidad, la compactación del suelo, la interacción con infraestructura rígida, la presión térmica asociada al efecto de isla de calor y la creciente densificación urbana exigen decisiones basadas en funcionalidad ecológica, estabilidad estructural y compatibilidad espacial.

La selección desarrollada en este capítulo responde a una evaluación técnica orientada a maximizar beneficios ecosistémicos, incluyendo la regulación térmica, la captura de carbono, la estabilización hídrica y la conectividad ecológica, al tiempo que se minimizan conflictos con la infraestructura urbana. Las especies han sido priorizadas según su escala estructural adulta, comportamiento radicular, resiliencia climática y viabilidad de manejo en el contexto municipal.

Este enfoque reconoce que no todas las especies disponibles en viveros o presentes en el paisaje urbano resultan adecuadas para consolidar una infraestructura verde eficiente. La planificación basada en criterios técnicos contribuye a reducir costos de mantenimiento, prevenir fallas estructurales y fortalecer la coherencia paisajística del sistema urbano.

La organización del capítulo responde a una clasificación funcional que distingue especies estructurantes de gran sombra, especies de sombra media, ornamentales de porte controlado y especies aptas para corredores ribereños urbanos. Esta categorización facilita la toma de decisiones espaciales y reduce la implantación indiscriminada, asociada históricamente a conflictos entre el arbolado y la infraestructura urbana.

9.1 Marco conceptual de selección

La clasificación funcional adoptada se sustenta en principios contemporáneos de silvicultura urbana e infraestructura verde, en los que la selección de especies arbóreas se orienta por su desempeño ecosistémico, su escala estructural y su compatibilidad espacial dentro del sistema urbano (Konijnendijk et al., 2005; Benedict & McMahon, 2006). Bajo este enfoque, el arbolado deja de concebirse como un elemento ornamental y se reconoce como una infraestructura biológica capaz de proveer servicios ecosistémicos medibles, tales como la regulación térmica, la captura de carbono, la estabilización del suelo y la mejora del microclima urbano (Nowak & Dwyer, 2007).

La organización de las especies responde a criterios técnicos asociados al porte adulto proyectado, la arquitectura de copa, el comportamiento radicular, la tolerancia edáfica e hídrica y su función dominante dentro del sistema urbano. Esta aproximación prioriza el desempeño ecológico y la resiliencia estructural por encima de la frecuencia histórica de plantación o la disponibilidad comercial en viveros.

La categorización en especies estructurantes de gran sombra, especies de sombra media, ornamentales de porte controlado y especies ribereñas obedece a una jerarquización funcional orientada a maximizar beneficios climáticos y reducir conflictos con la infraestructura urbana, en coherencia con los enfoques actuales de planificación verde y adaptación climática (Gill et al., 2007).

Esta clasificación no implica una exclusividad funcional estricta, sino la predominancia de atributos ecológicos y estructurales dentro del diseño estratégico de la infraestructura verde urbana.

9.2 Estructura del Perfil Funcional Urbano

El análisis de las especies se desarrolla mediante un Perfil Funcional Urbano, concebido como una herramienta sintética que integra atributos ecológicos, estructurales y operativos relevantes para su incorporación en la infraestructura verde de la Ciudad de Panamá. Este enfoque supera la descripción botánica tradicional y permite evaluar la pertinencia estratégica de cada especie dentro del sistema urbano.

La estructura del perfil responde a una lógica funcional que vincula la dimensión biológica del árbol con su desempeño espacial y su viabilidad de manejo. En este sentido, se establece el rol de la especie dentro de la infraestructura verde, diferenciando funciones estructurantes, de regulación térmica, ornamentales o de conectividad ecológica, lo que permite orientar su localización en función de la escala y los objetivos del diseño urbano.

Se incorpora una caracterización eco-morfológica sintética que incluye el porte adulto proyectado, la arquitectura de copa, la densidad foliar y el comportamiento del sistema radicular. Estos elementos permiten anticipar la interacción con el espacio aéreo, el subsuelo y la infraestructura urbana, aportando criterios técnicos para su implantación.

El perfil considera además la contribución de la especie a la regulación térmica, evaluada a partir de la extensión de sombra potencial, la densidad de copa y la capacidad de interceptación de radiación solar. Este componente resulta determinante en la configuración del confort térmico urbano.

La compatibilidad con la infraestructura urbana constituye otro eje de análisis, incorporando la evaluación de posibles interferencias con aceras, redes subterráneas, edificaciones y vialidad. Este criterio permite prevenir conflictos

estructurales asociados a selecciones inadecuadas y optimizar la sostenibilidad del sistema.

Asimismo, se incluye una valoración del nivel de mantenimiento requerido, en función de la frecuencia e intensidad de intervenciones necesarias para conservar la estabilidad estructural y el valor funcional del arbolado. Este aspecto incide directamente en la planificación operativa y presupuestaria a escala municipal.

El perfil se complementa con la identificación de restricciones técnicas y consideraciones de manejo, delimitando los contextos en los que la especie presenta limitaciones o requiere condiciones específicas de implantación. Esta información permite orientar decisiones basadas en criterios técnicos y no en generalizaciones.

Las especies se organizan en categorías funcionales definidas por su escala estructural, su rol ecológico dominante y su compatibilidad espacial dentro del sistema urbano. Entre ellas, las especies estructurantes de gran sombra conforman la base macroestructural de la infraestructura verde, al generar amplias superficies de sombra y contribuir de manera significativa a la regulación del microclima urbano.

La Tabla 9.1 sintetiza las principales categorías funcionales consideradas, junto con su función dominante dentro del sistema de infraestructura verde urbana.

Tabla 9.1

Categorías principales

Categoría funcional	**Altura aproximada**	**Función dominante**	**Ejemplos**
Estructurantes de gran sombra	>20 m	Regulación térmica y estructura del dosel urbano	Corotú, Espavé, Samán, Ceiba

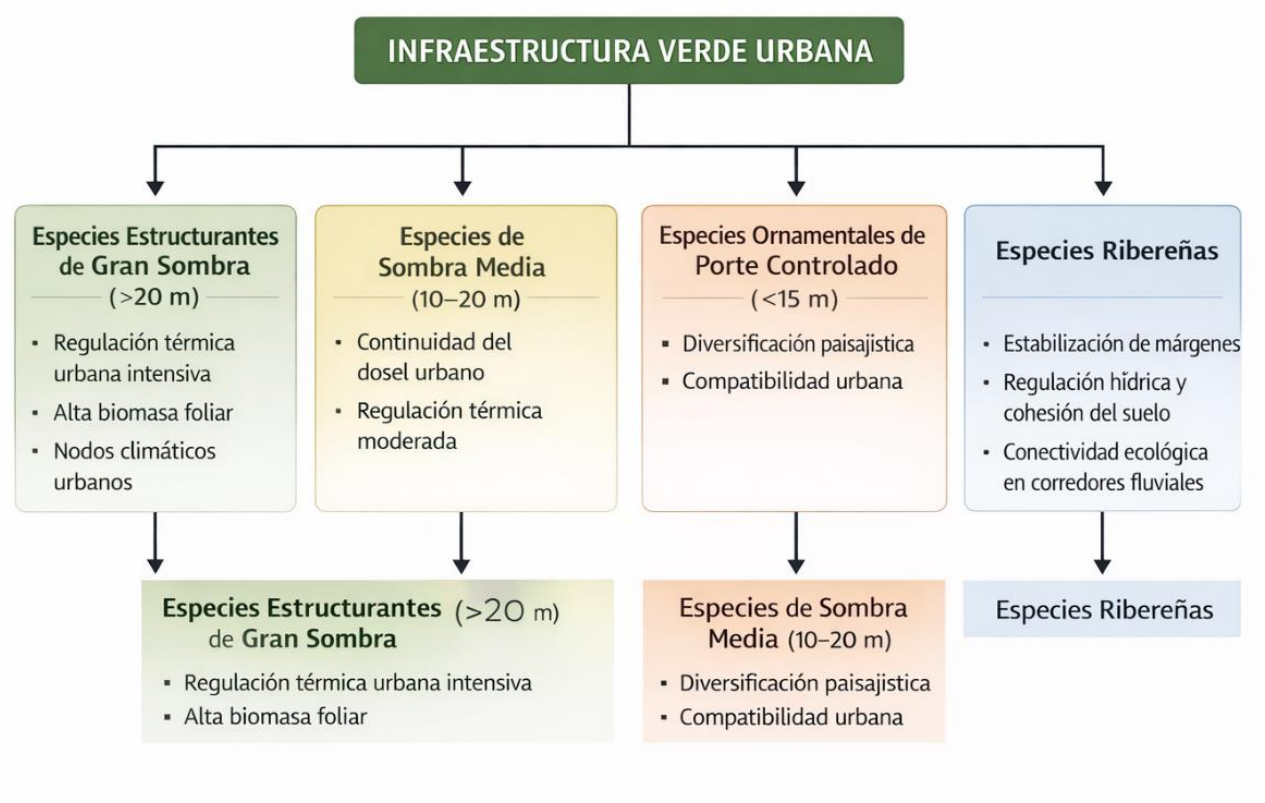
Categoría funcional	**Altura aproximada**	**Función dominante**	**Ejemplos**
Sombra media	10–20 m	Continuidad del dosel urbano y regulación térmica moderada	Guayacán, Roble rosado, Jacaranda
Ornamentales de porte controlado	<15 m	Diversificación paisajística y compatibilidad urbana	Cassia fistula, Lagerstroemia
Ribereñas	variable	Estabilización hídrica y conectividad ecológica	Majagua, Pachira, Inga

La clasificación funcional sintetizada en la Tabla 9.1 organiza las especies según su escala estructural, su función dominante y su ámbito de implantación dentro del sistema urbano. Esta estructura evidencia que el arbolado urbano no constituye un conjunto homogéneo, sino un sistema jerarquizado en el que cada grupo cumple funciones ecológicas y espaciales diferenciadas dentro de la infraestructura verde.

La Figura 9.1 ilustra de manera conceptual esta organización, mostrando la relación entre las distintas categorías funcionales y su papel en el diseño estratégico del arbolado urbano.

Figura 9.1

Clasificación funcional del arbolado urbano para la infraestructura verde de la Ciudad de Panamá.



La representación conceptual presentada en la Figura 9.1 permite interpretar la estructura jerárquica del arbolado urbano dentro del sistema de infraestructura verde. Las especies estructurantes de gran sombra ocupan un rol predominante en la configuración del microclima urbano, mientras que las especies de sombra media, ornamentales de porte controlado y ribereñas complementan el sistema mediante funciones de continuidad del dosel, diversificación paisajística y estabilización hídrica.

A partir de esta base conceptual, se desarrollan las especies prioritarias correspondientes a cada categoría funcional.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.3 Especies estructurantes de gran sombra

Las especies estructurantes de gran sombra constituyen la base macroestructural de la infraestructura verde urbana. Su función dominante es climática y espacial, al configurar nodos de regulación térmica capaces de modificar de manera significativa el microclima urbano mediante la generación de amplias superficies de sombra y elevada biomasa foliar.

La inclusión de una especie dentro de esta categoría responde a criterios técnicos definidos para la selección funcional del arbolado urbano. Para su clasificación como estructurante de gran sombra deben cumplirse de manera concurrente parámetros como: porte adulto superior a veinte metros o proyección de copa mayor a quince metros de diámetro, arquitectura amplia con alta capacidad de interceptación solar, sistema radical robusto que garantice estabilidad estructural, resiliencia frente a precipitaciones intensas y eventos de viento, requerimiento de espacios urbanos de gran escala y aporte significativo a servicios ecosistémicos como captura de carbono y mitigación del efecto de isla de calor.

Estas especies no deben implantarse en espacios confinados ni en alineaciones viales estrechas. Su establecimiento exige planificación anticipada, disponibilidad de volumen radicular suficiente y programas de mantenimiento estructural preventivo.

Las secciones siguientes desarrollan las especies que cumplen con estos parámetros funcionales.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.3.1 Corotú

Nombre científico: *Enterolobium cyclocarpum*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

El Corotú se emplea estratégicamente como especie estructurante de gran escala destinada a la provisión de sombra extensiva y regulación térmica en espacios urbanos amplios. Su función principal dentro de la infraestructura verde es actuar como elemento dominante de cobertura arbórea en parques y áreas metropolitanas.

Descripción general

Enterolobium cyclocarpum es un árbol caducifolio de gran porte que puede superar los veinticinco metros de altura y desarrollar copas ampliamente extendidas cuya proyección horizontal alcanza dimensiones considerables en condiciones favorables. Su arquitectura natural tiende a formar una estructura hemisférica o en forma de paraguas, con ramas primarias robustas que se expanden lateralmente desde un fuste sólido y bien definido. El crecimiento es moderado a relativamente rápido en etapas juveniles, especialmente en suelos profundos y bien drenados. La especie presenta un sistema radical vigoroso que combina

raíces profundas con componentes laterales extensos, lo que le confiere estabilidad mecánica cuando dispone de volumen de suelo suficiente.

Justificación técnica para uso urbano

Desde el punto de vista funcional, el Corotú destaca por su alta capacidad de interceptación solar, derivada de la amplitud y densidad de su copa. Esta característica lo convierte en una de las especies más eficientes para la mitigación del efecto de isla de calor urbano en ambientes tropicales. La sombra continua que genera reduce la temperatura superficial del pavimento y mejora el confort térmico en áreas recreativas. Asimismo, su condición de especie nativa favorece la biodiversidad urbana, proporcionando hábitat y recursos para aves y fauna asociada. Su tolerancia a periodos de sequía estacional aumenta su resiliencia ante escenarios de variabilidad climática.

Espacios urbanos recomendados

Su implantación resulta técnicamente adecuada en parques urbanos de gran extensión, plazas amplias, áreas recreativas metropolitanas, campus institucionales y zonas periurbanas donde pueda desarrollarse plenamente sin restricciones espaciales severas. En estos contextos, el Corotú cumple una función estructurante dentro del diseño paisajístico, configurando áreas de sombra permanente y consolidando nodos de amortiguamiento térmico.

Restricciones y consideraciones de manejo

No se recomienda su plantación en aceras, alineaciones viales estrechas ni en proximidad inmediata a edificaciones o redes subterráneas. El amplio desarrollo de su sistema radical exige volumen de suelo suficiente y distancias adecuadas respecto a infraestructura. En términos de manejo, requiere podas de formación tempranas para garantizar una estructura equilibrada y evitar codominancias que puedan convertirse en puntos de debilidad futura. En etapa adulta, las intervenciones deben limitarse a podas sanitarias y monitoreo estructural periódico.

Observación estratégica para la gestión municipal

El Corotú debe considerarse una especie prioritaria para proyectos de infraestructura verde de escala metropolitana. Su incorporación debe responder a planificación de largo plazo dentro de planes maestros de cobertura arbórea y no a decisiones aisladas de ornamentación urbana. Una selección adecuada de emplazamiento maximiza sus beneficios ecosistémicos y minimiza conflictos estructurales futuros.

9.3.2 Espavé

Nombre científico: *Anacardium excelsum*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

El Espavé se emplea como especie estructurante de gran escala destinada a la provisión de sombra amplia, estabilización paisajística y consolidación de nodos ecológicos dentro de la infraestructura verde urbana. Su función principal es conformar masas arbóreas dominantes en parques y áreas abiertas de dimensión metropolitana.

Descripción general

Anacardium excelsum es un árbol de gran porte que puede superar los treinta metros de altura en condiciones óptimas, desarrollando un fuste recto, cilíndrico y de notable robustez. Su copa tiende a ser amplia y relativamente densa, con ramificación bien distribuida cuando el crecimiento ocurre sin restricciones

espaciales severas. Presenta crecimiento vigoroso en ambientes tropicales húmedos y alta adaptabilidad a suelos profundos, incluyendo aquellos con humedad estacional elevada. El sistema radical es extenso y potente, combinando raíces profundas con expansión lateral significativa, lo que le confiere estabilidad mecánica cuando dispone de volumen edáfico suficiente.

Justificación técnica para uso urbano

Desde el punto de vista funcional, el Espavé ofrece una importante contribución a la regulación térmica debido a la amplitud de su copa y la densidad de su follaje. Su capacidad de generar sombra extensa favorece la disminución de temperatura superficial en áreas recreativas y espacios abiertos, mejorando el confort climático urbano. Asimismo, al tratarse de una especie nativa ampliamente distribuida en Panamá, contribuye a la conectividad ecológica y al mantenimiento de fauna asociada. Su tolerancia a condiciones de alta humedad lo convierte en una opción particularmente valiosa en zonas urbanas cercanas a cuerpos de agua o en sectores con drenaje lento.

Espacios urbanos recomendados

La especie resulta técnicamente adecuada para parques urbanos de gran extensión, corredores verdes metropolitanos, áreas ribereñas urbanizadas y campus institucionales con disponibilidad amplia de suelo. En estos entornos puede desarrollarse plenamente, consolidando estructuras de sombra continua y actuando como elemento dominante dentro del diseño paisajístico. Su uso debe integrarse en proyectos de infraestructura verde planificados a escala mayor, evitando emplazamientos confinados.

Restricciones y consideraciones de manejo

No se recomienda su plantación en aceras, calles estrechas ni en proximidad inmediata a edificaciones o infraestructura subterránea sensible. El vigor de su sistema radical exige distancias adecuadas y planificación anticipada del espacio subterráneo. En etapas juveniles, requiere podas de formación orientadas a

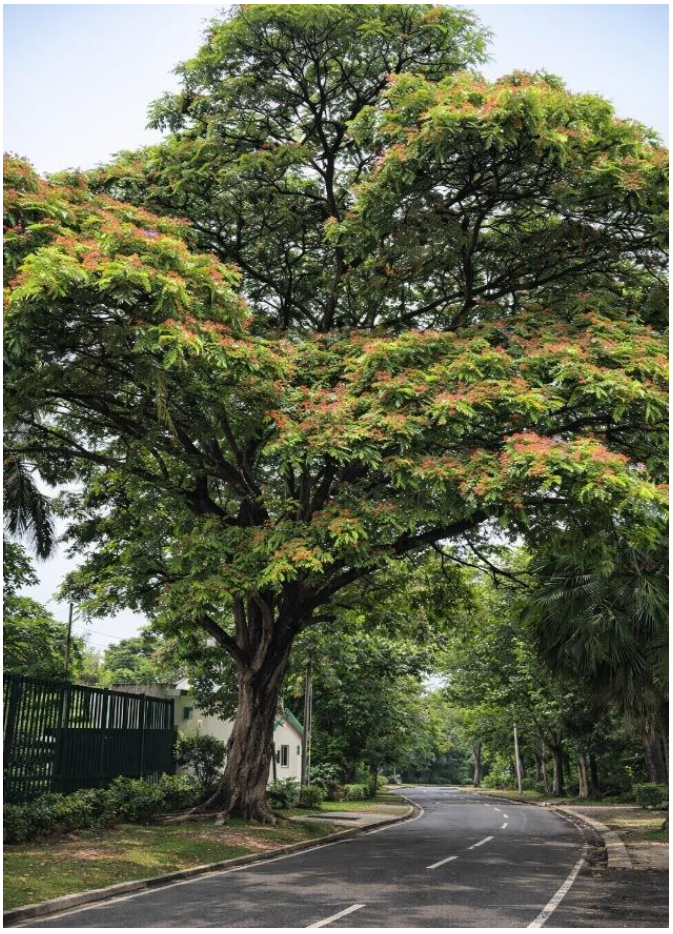
consolidar una estructura equilibrada y prevenir desequilibrios de copa. En etapa adulta, el mantenimiento debe centrarse en inspecciones estructurales periódicas y manejo sanitario, evitando intervenciones drásticas que alteren su arquitectura natural.

Observación estratégica para la gestión municipal

El Espavé debe considerarse especie prioritaria dentro de programas de expansión de cobertura arbórea en parques metropolitanos y corredores verdes estratégicos. Su selección debe formar parte de planes maestros de infraestructura verde que contemplen disponibilidad espacial suficiente y proyección de largo plazo. Su implantación adecuada permite maximizar beneficios ecosistémicos y reforzar la identidad forestal tropical de la ciudad.

9.3.3 Samán

Nombre científico: *Albizia saman*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

El Samán se emplea como especie estructurante de gran sombra destinada a parques metropolitanos, plazas amplias y espacios recreativos de gran escala donde se requiera cobertura térmica extensa y consolidación de nodos de infraestructura verde.

10.69821/978-628-97750-2-0

Descripción general

Albizia saman es un árbol de gran porte que puede alcanzar entre veinte y treinta metros de altura, desarrollando una copa amplia, extendida y de arquitectura horizontal que puede superar ampliamente el diámetro del fuste. Su crecimiento es relativamente rápido en condiciones tropicales favorables y presenta ramificación robusta cuando se desarrolla en espacios abiertos.

El follaje compuesto y denso genera sombra abundante y uniforme, favoreciendo la reducción de radiación solar directa sobre superficies pavimentadas y áreas de permanencia humana. El sistema radical es vigoroso y expansivo, requiriendo volumen de suelo suficiente para evitar interferencias con infraestructura cercana.

Justificación técnica para uso urbano

Desde la perspectiva funcional, el Samán constituye una de las especies más eficientes para la mitigación del efecto de isla de calor en espacios abiertos de gran escala. Su amplia superficie foliar permite reducción significativa de temperatura superficial y mejora del confort térmico en parques y explanadas.

Su arquitectura extendida favorece la creación de microclimas estables y zonas de sombra continua, lo que incrementa el valor social de los espacios públicos. Además, su biomasa significativa contribuye a la captura de carbono y al fortalecimiento estructural del dosel urbano.

No obstante, su tamaño adulto exige planificación rigurosa del emplazamiento, evitando su implantación en áreas con limitaciones espaciales o proximidad inmediata a edificaciones.

Espacios urbanos recomendados

Resulta adecuado exclusivamente para parques urbanos amplios, campus institucionales, áreas recreativas extensas y zonas periurbanas donde exista

disponibilidad suficiente de espacio aéreo y radicular. Puede emplearse como árbol dominante en configuraciones de sombra centralizada.

Restricciones y consideraciones de manejo

No debe plantarse en aceras estrechas ni en alineaciones viales convencionales debido a la magnitud de su copa y expansión radicular. Requiere podas de formación tempranas para consolidar estructura equilibrada y evitar codominancias débiles. En su etapa adulta, las intervenciones deben limitarse a mantenimiento sanitario y evaluación estructural periódica.

Observación estratégica para la gestión municipal

El Samán debe considerarse especie macroestructurante dentro de la infraestructura verde urbana, reservada para proyectos de escala metropolitana. Su implantación adecuada permite consolidar espacios públicos de alto valor térmico y paisajístico; su uso indiscriminado en contextos confinados puede generar conflictos estructurales y costos de mantenimiento elevados.

9.3.4 Ceiba

Nombre científico: *Ceiba pentandra*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

La Ceiba se emplea como especie estructurante de gran escala destinada a parques metropolitanos, espacios institucionales amplios y áreas verdes de dimensión significativa donde se requiera presencia arbórea dominante y regulación térmica extensiva.

10.69821/978-628-97750-2-0

Descripción general

Ceiba pentandra es un árbol emergente de gran porte que puede superar los treinta metros de altura en condiciones favorables. Se caracteriza por un fuste recto y robusto, frecuentemente provisto de contrafuertes basales (raíces tablares) que le confieren estabilidad mecánica y fuerte identidad visual. Su copa es amplia y elevada, con ramificación extendida en estratos superiores. Presenta comportamiento parcialmente caducifolio y crecimiento relativamente rápido en ambientes tropicales húmedos.

El sistema radical es vigoroso y requiere amplio volumen de suelo, desarrollando raíces superficiales y profundas que contribuyen a la estabilidad estructural en suelos bien drenados.

Justificación técnica para uso urbano

Desde la perspectiva funcional, la Ceiba aporta sombra significativa en espacios abiertos de gran escala y contribuye a la mitigación térmica en parques urbanos extensos. Su elevada biomasa favorece captura de carbono y consolidación de nodos ecológicos dentro de la infraestructura verde.

Además de su función ambiental, posee alto valor simbólico y cultural en el contexto tropical, lo que refuerza su papel como especie emblemática en el paisaje urbano panameño. Sin embargo, su tamaño adulto exige planificación rigurosa para evitar conflictos con infraestructura.

Espacios urbanos recomendados

Resulta adecuada exclusivamente para parques metropolitanos, áreas verdes amplias, zonas periurbanas y campus institucionales donde exista disponibilidad suficiente de espacio aéreo y radicular. Puede emplearse como árbol focal o estructurante dentro de grandes explanadas.

Restricciones y consideraciones de manejo

No debe plantarse en aceras, alineaciones viales ni espacios confinados. Los contrafuertes basales pueden generar interferencias si se ubica cerca de infraestructura rígida. Requiere planificación anticipada del emplazamiento y monitoreo estructural periódico en etapas de madurez. Las podas deben limitarse a intervenciones sanitarias y de formación temprana.

Observación estratégica para la gestión municipal

La Ceiba debe considerarse especie de uso altamente selectivo dentro de la infraestructura verde urbana. Su implantación adecuada puede generar hitos paisajísticos de gran valor ecológico y cultural; su ubicación inadecuada puede derivar en conflictos estructurales significativos. Debe integrarse únicamente en proyectos de escala metropolitana y planificación de largo plazo.

9.3.5 Caoba

Nombre científico: *Swietenia macrophylla*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

La Caoba se emplea como especie estructurante de gran porte destinada a avenidas amplias, parques urbanos y espacios institucionales donde se requiera sombra consistente, estabilidad estructural y continuidad arbórea de largo plazo.

10.69821/978-628-97750-2-0

Descripción general

Swietenia macrophylla es un árbol de gran tamaño que puede alcanzar entre veinte y treinta metros de altura en condiciones favorables. Presenta fuste recto, cilíndrico y bien definido, con copa amplia de forma relativamente ovalada o redondeada cuando dispone de espacio suficiente para su desarrollo. Su crecimiento es moderado y su follaje, de textura fina y compuesta, permite una sombra densa pero no excesivamente opresiva.

El sistema radical es profundo y relativamente bien estructurado cuando el suelo no se encuentra severamente compactado, lo que le confiere estabilidad mecánica adecuada en alineaciones amplias y parques urbanos.

Justificación técnica para uso urbano

Desde la perspectiva funcional, la Caoba ofrece regulación térmica significativa en avenidas amplias y parques, contribuyendo a la reducción de radiación directa sobre superficies pavimentadas. Su arquitectura vertical definida facilita alineaciones ordenadas, lo que la hace apropiada para corredores urbanos donde se requiera uniformidad estructural.

Además, su madera densa y estructura relativamente equilibrada favorecen estabilidad biomecánica cuando se realiza formación temprana adecuada. Como especie nativa de la región neotropical, contribuye al fortalecimiento de identidad forestal en el paisaje urbano.

Espacios urbanos recomendados

Resulta adecuada para avenidas principales con franjas verdes amplias, parques urbanos, campus institucionales y proyectos de arborización planificada a mediana y gran escala. Puede utilizarse en alineaciones viales siempre que se garantice espacio radicular suficiente y distancias adecuadas respecto a infraestructura.

Restricciones y consideraciones de manejo

No debe plantarse en aceras estrechas ni en suelos extremadamente compactados sin acondicionamiento previo. Requiere podas de formación tempranas para consolidar estructura equilibrada y evitar ramas mal **insertadas.** La caída estacional de hojas debe contemplarse en planes de mantenimiento en zonas de alto tránsito peatonal.

Observación estratégica para la gestión municipal

La Caoba debe integrarse como especie estructurante en programas de arborización urbana de largo plazo, especialmente en avenidas históricas y espacios institucionales amplios. Su correcta ubicación permite combinar regulación térmica, estabilidad estructural y valor paisajístico, mientras que su implantación en espacios inadecuados puede limitar su desarrollo y generar costos adicionales de mantenimiento.

9.4 Especies de sombra media

Las especies de sombra media desempeñan una función articuladora dentro de la infraestructura verde urbana, actuando como elementos de continuidad térmica y paisajística entre nodos estructurantes y espacios urbanos intermedios. Su escala adulta es moderada, permitiendo equilibrio entre cobertura vegetal y compatibilidad con infraestructura.

La clasificación dentro de esta categoría responde a criterios técnicos orientados a garantizar desempeño funcional sin alcanzar dimensión macroestructural. Para su inclusión deben cumplirse de forma simultánea los siguientes parámetros metodológicos: porte adulto intermedio, generalmente entre diez y veinte metros; arquitectura capaz de proporcionar sombra funcional moderada; sistema radical compatible con suelos urbanos acondicionados; resiliencia frente a variabilidad climática tropical; aptitud para avenidas amplias y plazas de escala media; y contribución paisajística relevante mediante floración o arquitectura distintiva.

Estas especies complementan, pero no sustituyen, a los estructurantes mayores. Su implantación debe responder a planificación diferenciada según escala urbana.

9.4.1 Guayacán amarillo

Nombre científico: *Handroanthus chrysanth*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

El Guayacán amarillo se emplea como especie de sombra media con alto valor ornamental, especialmente adecuada para avenidas amplias, plazas urbanas y espacios institucionales donde se busque identidad visual estacional.

Descripción general

Handroanthus chrysanthus es un árbol de porte medio que puede alcanzar entre ocho y quince metros de altura. Presenta copa relativamente abierta y arquitectura equilibrada cuando se desarrolla con formación adecuada. Su rasgo más distintivo es la floración amarilla intensa durante la estación seca, que genera fuerte impacto visual en el paisaje urbano.

El sistema radical es moderado y menos agresivo que el de especies estructurantes mayores, lo que favorece su compatibilidad en espacios urbanos intermedios.

Justificación técnica para uso urbano

Aporta regulación térmica moderada mediante sombra parcial, contribuyendo al confort ambiental sin requerir grandes volúmenes de suelo. Su principal valor estratégico radica en su impacto paisajístico y en el fortalecimiento de identidad urbana tropical.

Espacios urbanos recomendados

Avenidas secundarias amplias, bulevares con franjas verdes, plazas medianas y entornos institucionales.

Restricciones y consideraciones de manejo

No apto para aceras estrechas ni espacios extremadamente confinados. Requiere podas de formación tempranas para consolidar estructura estable.

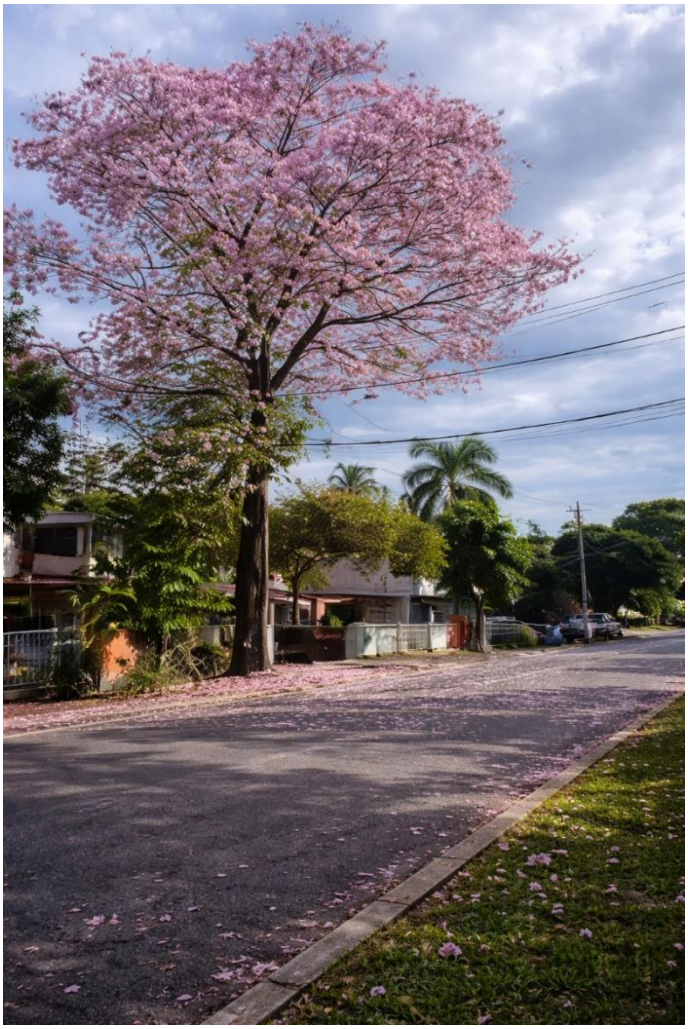
Observación estratégica

Debe integrarse como especie de continuidad paisajística en corredores urbanos, evitando su sustitución por especies de mayor porte donde se requiera sombra extensiva.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.4.2 Roble rosado / Roble de sabana

Nombre científico: *Tabebuia rosea*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

El Roble rosado se emplea como especie de sombra media en avenidas amplias, parques urbanos y proyectos institucionales donde se requiera equilibrio entre cobertura térmica e impacto ornamental.

Descripción general

Tabebuia rosea es un árbol de porte medio a grande que puede alcanzar entre quince y veinte metros de altura. Presenta copa amplia pero no excesivamente densa, con arquitectura relativamente simétrica cuando se desarrolla en condiciones favorables. Su floración rosada estacional constituye uno de los elementos paisajísticos más representativos del entorno urbano panameño.

El sistema radical es profundo y estructurado cuando dispone de suelo adecuado.

Justificación técnica para uso urbano

Proporciona sombra moderada a buena, contribuyendo a la reducción de radiación directa en corredores urbanos amplios. Su tamaño intermedio permite compatibilidad espacial en avenidas bien planificadas.

Espacios urbanos recomendados

Avenidas principales con franjas verdes amplias, parques urbanos y campus institucionales.

Restricciones y consideraciones de manejo

Requiere formación estructural temprana para evitar codominancias. No debe plantarse en espacios extremadamente limitados.

Observación estratégica

Especie emblemática del paisaje urbano panameño, adecuada para reforzar identidad y continuidad térmica en corredores de escala media.

9.4.3 Tamarindo

Nombre científico: *Tamarindus indica*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

El tamarindo se emplea como especie de sombra media a amplia, adecuada para espacios urbanos con disponibilidad suficiente de suelo y donde se requiera cobertura térmica efectiva con alta tolerancia a condiciones ambientales variables.

Descripción general

Tamarindus indica es un árbol de porte medio a grande que alcanza entre doce y veinte metros de altura. Presenta copa densa y extendida, con ramificación amplia y follaje fino que favorece la generación de sombra

continua. Su crecimiento es moderado y su sistema radical es profundo y relativamente estable cuando dispone de volumen adecuado de suelo.

Justificación técnica para uso urbano

Ofrece regulación térmica eficiente debido a la densidad de su copa y su capacidad de sombreado. Presenta alta tolerancia a sequía estacional y buena adaptación a condiciones urbanas, lo que lo convierte en una especie funcional para mejorar el confort térmico en espacios abiertos.

Espacios urbanos recomendados

Parques urbanos, avenidas amplias, espacios públicos abiertos y áreas periurbanas con volumen de suelo suficiente para el desarrollo radicular**.**

Restricciones y consideraciones de manejo

No es recomendable para aceras estrechas ni espacios confinados. La producción de frutos y la caída de material orgánico deben considerarse dentro de los programas de mantenimiento. Requiere podas de formación en etapas tempranas para estructurar adecuadamente la copa.

Observación estratégica

Puede integrarse como especie complementaria en la ampliación de la cobertura arbórea, especialmente en espacios abiertos donde se priorice la generación de sombra efectiva y la resiliencia climática bajo condiciones urbanas.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.4.4 Jacaranda

Nombre científico: *Jacaranda mimosifolia*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

La Jacaranda se emplea como especie de sombra media con alto valor ornamental y aporte moderado a la regulación térmica, especialmente adecuada para avenidas amplias, bulevares urbanos y espacios institucionales donde se busque identidad paisajística estacional sin comprometer la compatibilidad estructural.

Descripción general

Jacaranda mimosifolia es un árbol de porte medio que generalmente alcanza entre doce y veinte metros de altura en condiciones favorables. Presenta copa relativamente abierta y ligera, con follaje fino y compuesto que permite el paso parcial de luz, generando sombra filtrada. Su crecimiento es moderado y su arquitectura puede desarrollarse de manera equilibrada cuando recibe podas de formación adecuadas en etapas juveniles.

La floración violeta intensa constituye su rasgo distintivo más relevante, transformando visualmente el paisaje urbano durante la estación seca. El sistema radical es menos agresivo que el de especies estructurantes mayores, aunque requiere espacio edáfico suficiente para un desarrollo estable.

Justificación técnica para uso urbano

Desde el punto de vista funcional, la Jacaranda proporciona regulación térmica moderada, adecuada para corredores urbanos donde no se requiera sombra densa permanente. Su valor estratégico principal radica en la construcción de identidad paisajística y en la diversificación cromática del dosel urbano.

Su tamaño intermedio reduce la probabilidad de conflictos estructurales severos cuando se implanta en espacios correctamente dimensionados.

Espacios urbanos recomendados

Avenidas secundarias amplias, bulevares con franjas verdes centrales, plazas urbanas de escala media y proyectos institucionales con espacio aéreo suficiente.

Restricciones y consideraciones de manejo

No se recomienda en aceras estrechas ni en suelos altamente compactados sin acondicionamiento previo. Requiere podas de formación tempranas para consolidar estructura estable y evitar codominancias débiles. La caída estacional de flores debe contemplarse en programas de mantenimiento.

Observación estratégica

Debe integrarse como especie de sombra media con fuerte componente identitario, contribuyendo a la continuidad paisajística del sistema verde urbano sin sustituir a las especies estructurantes de gran sombra.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.4.5 Flamboyán

Nombre científico: *Delonix regia*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

El Flamboyán se emplea como especie de sombra media a amplia con alto impacto ornamental, destinada a parques urbanos, avenidas amplias y espacios recreativos donde se busque cobertura térmica combinada con fuerte presencia paisajística estacional.

Descripción general

Delonix regia es un árbol de porte medio a grande que puede alcanzar entre diez y quince metros de altura, desarrollando una copa amplia, extendida y horizontal que proporciona sombra considerable. Su crecimiento es relativamente rápido en ambientes tropicales y presenta floración roja intensa durante la estación seca, convirtiéndose en uno de los árboles ornamentales más representativos del paisaje urbano.

Su sistema radical es superficial y expansivo, especialmente en suelos compactados o con limitaciones de profundidad, lo que requiere planificación cuidadosa del emplazamiento.

10.69821/978-628-97750-2-0

Justificación técnica para uso urbano

El Flamboyán ofrece sombra efectiva en espacios abiertos y contribuye a la reducción de radiación directa sobre áreas pavimentadas. Sin embargo, su madera puede presentar menor resistencia mecánica comparada con especies estructurantes mayores, y su arquitectura puede desarrollar puntos de debilidad si no recibe formación adecuada.

Por ello, su valor urbano radica en el equilibrio entre regulación térmica moderada y alto impacto ornamental, más que en su robustez estructural.

Espacios urbanos recomendados

Parques urbanos amplios, plazas de escala media a grande y avenidas con franjas verdes generosas donde exista volumen de suelo suficiente.

Restricciones y consideraciones de manejo

No apto para aceras estrechas ni espacios confinados. Puede generar levantamiento de pavimentos debido a su sistema radical superficial. Requiere podas de formación tempranas para evitar codominancias y reducir riesgos estructurales. La caída de flores y vainas debe contemplarse en planes de mantenimiento.

Observación estratégica

Debe utilizarse de manera selectiva y planificada. Su implantación indiscriminada puede generar conflictos estructurales; su ubicación estratégica en espacios amplios permite maximizar su valor paisajístico y funcional.

9.5 Especies ornamentales de porte controlado

Las especies ornamentales de porte controlado cumplen una función complementaria dentro de la infraestructura verde urbana, facilitando la incorporación de cobertura arbórea en espacios con restricciones dimensionales.

Su contribución térmica es localizada y su principal valor radica en la compatibilidad estructural y la diversificación paisajística.

La inclusión en esta categoría se fundamenta en criterios de control dimensional y viabilidad operativa municipal. Para su clasificación deben cumplirse de manera concurrente los siguientes parámetros metodológicos: porte adulto generalmente inferior a quince metros; copa proporcionalmente contenida; sistema radical de comportamiento moderado; sombra ligera a moderada; adaptabilidad a suelos urbanos acondicionados; y valor ornamental significativo sin comprometer estabilidad estructural.

Estas especies no deben considerarse sustitutos funcionales de árboles estructurantes, sino herramientas estratégicas para diversificar el dosel urbano en espacios limitados.

9.5.1 Orgullo de la India

Nombre científico: *Lagerstroemia speciosa*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

Se emplea como especie ornamental de porte medio destinada a avenidas secundarias, plazas pequeñas y espacios institucionales donde se requiera equilibrio entre valor estético y control dimensional.

Descripción general

Árbol de tamaño medio que alcanza entre ocho y quince metros de altura, con copa relativamente compacta y estructura ramificada definida. Presenta

floración vistosa en tonos rosados o púrpuras durante la estación lluviosa, lo que aporta dinamismo visual al paisaje urbano.

Justificación técnica

Ofrece sombra ligera a moderada y presenta sistema radical menos agresivo que especies estructurantes. Su tamaño adulto facilita compatibilidad con entornos urbanos intermedios.

Espacios recomendados

Avenidas secundarias, plazas pequeñas, estacionamientos arborizados y áreas institucionales.

Restricciones

No apto para aceras extremadamente estrechas. Requiere formación temprana para evitar ramificación débil.

Observación estratégica

Debe utilizarse como especie ornamental de continuidad paisajística y no como sustituto de especies de gran sombra.

9.5.2 Lluvia de oro

Nombre científico: *Cassia fistula*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

Especie ornamental de porte medio utilizada en avenidas amplias y plazas urbanas con énfasis en impacto floral estacional.

10.69821/978-628-97750-2-0

Descripción general

Árbol que alcanza entre ocho y quince metros de altura, con copa relativamente abierta. Destaca por racimos colgantes de flores amarillas intensas durante la estación seca.

Justificación técnica

Aporta sombra moderada y alto valor ornamental. Sistema radical moderadamente desarrollado, compatible con espacios intermedios bien planificados.

Espacios recomendados

Bulevares, plazas medianas y corredores institucionales.

Restricciones

Caída de flores y vainas requiere mantenimiento programado. No apto para espacios excesivamente confinados.

Observación estratégica

Debe incorporarse como complemento ornamental dentro de corredores urbanos planificados.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.5.3 Calistemo

Nombre científico: *Callistemon citrinus*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

Especie ornamental de pequeño a mediano porte utilizada en aceras amplias y plazas de escala reducida.

Descripción general

Alcanza entre cinco y ocho metros de altura, con copa compacta y follaje perennifolio. Presenta inflorescencias rojas cilíndricas distintivas.

Justificación técnica

Bajo potencial de conflicto estructural. Aporta diversidad cromática y continuidad verde anual.

Espacios recomendados

Áreas residenciales, plazas pequeñas y aceras amplias con suelo acondicionado.

Restricciones

No sustituye especies de gran sombra. Requiere podas ligeras de formación.

Observación estratégica

Adecuado para incrementar cobertura vegetal en espacios confinados.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.5.4 Pata de vaca

Nombre científico: *Bauhinia variegata*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

Especie ornamental de porte medio empleada en espacios urbanos intermedios con énfasis floral.

Descripción general

Alcanza entre seis y doce metros de altura. Presenta hojas bilobadas distintivas y floración rosada o púrpura vistosa.

Justificación técnica

Aporta sombra ligera y fuerte valor estético. Sistema radical relativamente contenido.

Espacios recomendados

Plazas pequeñas, avenidas secundarias y entornos institucionales.

Restricciones

No apta para espacios muy reducidos. Requiere mantenimiento estructural temprano.

Observación estratégica

Especie ornamental complementaria dentro de planes de diversificación urbana.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.5.5 Uvero

Nombre científico: *Cordia sebestena*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

Especie ornamental costera adecuada para entornos urbanos con influencia salina.

Descripción general

Árbol de pequeño a mediano porte que alcanza entre seis y diez metros de altura. Presenta floración naranja intensa y follaje perennifolio.

Justificación técnica

Tolerancia a salinidad y viento. Sombra ligera a moderada.

Espacios recomendados

Zonas costeras urbanizadas, avenidas cercanas al mar y plazas pequeñas.

Restricciones

No genera sombra extensa. Requiere planificación adecuada del espacio radicular.

Observación estratégica

Adecuada para reforzar identidad paisajística costera.

9.5.6 Pino hindú

Nombre científico: *Polyalthia longifolia*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

Especie ornamental vertical utilizada en alineaciones formales y espacios urbanos estrechos donde se requiera control dimensional.

Descripción general

Árbol de porte medio que puede alcanzar entre diez y veinte metros de altura, con arquitectura vertical y copa estrecha. Presenta follaje perennifolio y crecimiento relativamente rápido.

Justificación técnica

Su forma columnar reduce interferencias laterales con infraestructura y facilita implantación en espacios urbanos confinados.

Espacios recomendados

Avenidas con espacio lateral limitado, franjas verdes estrechas y entornos institucionales.

Restricciones

No aporta sombra extensa. Debe utilizarse como complemento estructural y no como especie de regulación térmica principal.

10.69821/978-628-97750-2-0

Observación estratégica

Especie funcional para alineaciones formales, compatible con planificación urbana de alta densidad.

9.6 Especies para corredores ribereños urbanos

Las especies destinadas a corredores ribereños urbanos cumplen una función ecológica especializada asociada a la gestión hídrica, estabilización de márgenes y fortalecimiento de la conectividad ecológica. En ciudades tropicales húmedas, su selección constituye un componente esencial de la infraestructura verde vinculada al sistema fluvial urbano.

La clasificación dentro de esta categoría responde a criterios ecológicos específicos. Para su inclusión deben cumplirse de manera simultánea los siguientes parámetros metodológicos: tolerancia a suelos con saturación periódica o fluctuación del nivel freático; sistema radical capaz de incrementar cohesión superficial del suelo; resiliencia frente a eventos de lluvia intensa; afinidad ecológica natural a ambientes ribereños o costeros; contribución a la regulación microclimática de cuerpos de agua; y fortalecimiento de la biodiversidad asociada a corredores verdes.

Estas especies no se seleccionan prioritariamente por su valor ornamental, sino por su función ecológica estratégica en la resiliencia hídrica urbana.

9.6.1 Majagua

Nombre científico: *Hibiscus tiliaceus*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

La Majagua se emplea como especie ribereña estratégica destinada a la estabilización de márgenes, consolidación de parques lineales y fortalecimiento de corredores ecológicos urbanos asociados a cuerpos de agua. Aunque frecuentemente utilizada como especie ornamental en espacios urbanos, su aptitud ecológica natural corresponde a ambientes ribereños y costeros con suelos de drenaje variable.

Descripción general

Hibiscus tiliaceus es un árbol o arbolito de porte medio que alcanza entre seis y doce metros de altura. Presenta copa amplia, ramificación extendida y follaje denso, con crecimiento relativamente rápido en condiciones tropicales húmedas. Se adapta a suelos con saturación periódica y muestra tolerancia a fluctuaciones del nivel freático.

Su sistema radical es fibroso y ampliamente ramificado, con predominio de raíces laterales superficiales que incrementan la cohesión del suelo en taludes y márgenes fluviales.

Justificación técnica

Desde la perspectiva de bioingeniería ribereña, la Majagua contribuye a la estabilización mecánica del suelo mediante el entrelazamiento radicular, aumentando la resistencia al desprendimiento superficial y reduciendo procesos erosivos en eventos de lluvia intensa.

Su copa intercepta precipitación, disminuyendo la energía cinética de impacto sobre el suelo y reduciendo escorrentía superficial directa. Además, su tolerancia a suelos húmedos la convierte en alternativa viable para restauración de bordes fluviales urbanos donde otras especies ornamentales convencionales fracasarían.

La sombra parcial que genera sobre cuerpos de agua contribuye a la regulación térmica local y favorece condiciones microclimáticas más estables para la biodiversidad asociada.

Espacios urbanos recomendados

Parques lineales ribereños, bordes de ríos y quebradas urbanas, zonas de amortiguamiento hídrico y proyectos de restauración ecológica en áreas con drenaje lento o fluctuaciones hídricas.

Restricciones y consideraciones de manejo

No se recomienda su implantación en aceras completamente secas ni en espacios excesivamente confinados donde el suelo no permita desarrollo radicular lateral. Requiere monitoreo inicial para asegurar correcta implantación en taludes y zonas de pendiente.

Observación estratégica para la gestión municipal

La Majagua debe priorizarse en proyectos de infraestructura verde vinculados a gestión hídrica urbana. Su utilización en contextos ornamentales es válida, pero su valor estratégico principal radica en su función ecológica ribereña y en su

capacidad de incrementar la resiliencia de márgenes urbanos frente a eventos de precipitación intensa.

9.6.2 Castaño de agua

Nombre científico: *Pachira aquatica*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

Especie de sombra moderada destinada a corredores ribereños y zonas con drenaje lento.

Descripción general

Árbol de porte medio que puede alcanzar entre diez y veinte metros de altura. Presenta fuste recto y copa amplia de densidad media. Alta afinidad por suelos húmedos.

Justificación técnica

Tolerancia a suelos saturados y buena estabilidad en ambientes ribereños. Contribuye a conectividad ecológica.

Espacios recomendados

Parques lineales ribereños y áreas de amortiguamiento hídrico.

Restricciones

No recomendable en aceras estrechas ni en suelos excesivamente secos.

Observación estratégica

Prioritaria en proyectos de infraestructura verde vinculada a sistemas hídricos urbanos.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.6.3 Almendro de playa

Nombre científico: *Terminalia catappa*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

El Almendro de playa se emplea como especie de sombra amplia en parques costeros, corredores ribereños y espacios urbanos próximos a cuerpos de agua donde se requiera tolerancia a suelos arenosos, drenaje variable y salinidad moderada. Aunque frecuentemente utilizado como árbol ornamental en avenidas y áreas recreativas, su afinidad ecológica natural corresponde a ambientes costeros y ribereños tropicales.

Descripción general

Terminalia catappa es un árbol de porte medio a grande que puede alcanzar entre quince y veinticinco metros de altura. Se caracteriza por una arquitectura estratificada en niveles horizontales bien definidos, con ramas dispuestas en verticilos que generan una copa amplia y simétrica cuando dispone de espacio suficiente. Presenta sistema radical robusto, con raíces adaptadas a suelos arenosos o de textura suelta, y tolerancia a condiciones de salinidad moderada. Su follaje es denso durante gran parte del año, con comportamiento parcialmente caducifolio estacional.

Justificación técnica para uso urbano

Desde el punto de vista ecológico, el Almendro de playa posee adaptaciones fisiológicas y estructurales que le permiten desarrollarse en suelos costeros, márgenes fluviales bajos y ambientes con alta exposición solar y viento. Su sistema radical contribuye a la estabilización superficial en suelos arenosos y a la consolidación de áreas costeras urbanizadas.

Su copa amplia genera regulación térmica significativa en espacios abiertos, reduciendo radiación directa y mejorando el confort climático en parques ribereños y zonas recreativas.

Adicionalmente, su capacidad de tolerar salinidad lo diferencia de muchas especies ornamentales convencionales que no soportan condiciones costeras o ribereñas.

Espacios urbanos recomendados

Parques costeros, bulevares frente al mar, áreas ribereñas amplias y espacios recreativos cercanos a cuerpos de agua donde exista volumen de suelo suficiente para su desarrollo radicular.

Restricciones y consideraciones de manejo

No se recomienda en aceras estrechas ni en alineaciones viales confinadas debido a la amplitud de su copa y al volumen radicular requerido. La caída estacional de hojas y frutos puede generar acumulación considerable en superficies pavimentadas, lo que exige planificación de mantenimiento.

Observación estratégica para la gestión municipal

El Almendro de playa debe priorizarse en proyectos de infraestructura verde costera y ribereña donde su adaptación ecológica natural represente una ventaja funcional. Su uso exclusivamente ornamental en contextos urbanos densos puede

generar conflictos estructurales; su implantación estratégica en entornos costeros y fluviales maximiza su desempeño ecológico y climático.

9.6.4 Guaba

Nombre científico: *Inga edulis*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

Especie ribereña de sombra media empleada en restauración ecológica urbana.

Descripción general

Árbol de porte medio que alcanza entre diez y veinte metros. Presenta copa extendida y crecimiento relativamente rápido en ambientes húmedos.

Justificación técnica

Contribuye a fijación de nitrógeno y mejora de suelos. Alta adaptabilidad a zonas ribereñas.

Espacios recomendados

Corredores fluviales urbanos y áreas de recuperación ambiental.

Restricciones

No apto para aceras estrechas ni espacios secos prolongados.

Observación estratégica

Adecuada para fortalecer conectividad ecológica en sistemas urbanos fragmentados.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.6.5 Poró ribereño

Nombre científico: *Erythrina fusca*



Perfil Funcional Urbano

Uso en arbolado urbano

Especie adaptada a ambientes húmedos utilizada en estabilización de márgenes y recuperación de humedales urbanos.

Descripción general

Árbol de porte medio que puede alcanzar entre ocho y quince metros. Presenta floración roja llamativa y crecimiento relativamente rápido.

Justificación técnica

Alta tolerancia a suelos inundables. Contribuye a biodiversidad urbana y estabilización de márgenes.

Espacios recomendados

Zonas ribereñas, áreas de amortiguamiento y parques lineales.

Restricciones

No adecuada para alineaciones viales secas.

Observación estratégica

Especie funcional para consolidar resiliencia hídrica en infraestructura verde urbana.

10.69821/978-628-97750-2-0

9.7 Estrategias y lineamientos para su implementación

Las especies prioritarias desarrolladas en el presente capítulo constituyen una selección estratégica orientada a consolidar la infraestructura verde urbana bajo criterios de funcionalidad ecológica, resiliencia estructural y compatibilidad espacial. Esta aproximación se alinea con los principios contemporáneos de planificación verde, en los cuales el arbolado urbano es entendido como infraestructura ecológica capaz de generar servicios ecosistémicos medibles y sostenibles en el tiempo (Benedict & McMahon, 2006; Konijnendijk et al., 2005).

La organización en categorías funcionales —estructurantes de gran sombra, especies de sombra media, ornamentales de porte controlado y especies ribereñas— permite reconocer que el sistema arbóreo urbano no es homogéneo, sino jerarquizado. Cada grupo cumple una función dominante dentro del tejido urbano: regulación térmica extensiva, continuidad del dosel, diversificación paisajística o estabilización hídrica. Esta diferenciación funcional es coherente con los enfoques de adaptación climática urbana que enfatizan la importancia de integrar infraestructura verde en la mitigación del efecto de isla de calor y en la gestión sostenible del agua urbana (Gill et al., 2007; Nowak & Dwyer, 2007).

La implementación efectiva de esta selección estratégica requiere su incorporación en planes maestros de cobertura arbórea, considerando proyección de crecimiento adulto, volumen radicular disponible, condiciones edáficas y capacidad operativa municipal. La plantación constituye únicamente la fase inicial del ciclo de vida del arbolado urbano; su consolidación estructural y desempeño ecosistémico dependen de programas continuos de monitoreo, mantenimiento preventivo y evaluación técnica.

En este sentido, el siguiente capítulo aborda los lineamientos de gestión y mantenimiento a largo plazo, asegurando que las especies aquí priorizadas alcancen su máximo potencial funcional dentro de la infraestructura verde de la Ciudad de Panamá.

La selección estratégica de especies arbóreas para la infraestructura verde urbana debe responder a un proceso técnico que integre las condiciones del sitio, los atributos ecológicos de las especies y su función dentro del sistema urbano. Como se muestra en la Figura 9.2, este proceso implica evaluar las características del entorno urbano, aplicar criterios de selección silvicultural y ubicar cada especie dentro de una categoría funcional que permita maximizar su aporte ecosistémico.

Figura 9.2

Modelo conceptual para la selección estratégica de especies en la infraestructura verde urbana.



Nota. Elaboración propia con base en los principios de planificación de infraestructura verde urbana descritos por Konijnendijk et al. (2005), Benedict y McMahon (2006) y Nowak y Dwyer (2007).

10.69821/978-628-97750-2-0

El modelo conceptual propuesto sintetiza el proceso técnico mediante el cual la selección de especies arbóreas se incorpora de manera coherente dentro de la planificación de la infraestructura verde urbana. Este enfoque reconoce que la elección de especies trasciende los criterios estrictamente ornamentales y responde a un proceso sistemático que integra las condiciones biofísicas del sitio, las características funcionales de cada especie y los objetivos ecológicos del sistema urbano.

Desde esta perspectiva, la selección arbórea se concibe como una decisión técnica multidimensional, en la que interactúan variables como disponibilidad de espacio, condiciones edáficas, régimen hídrico, exposición urbana y requerimientos de manejo. A su vez, los atributos funcionales de las especies —incluyendo su capacidad de regulación térmica, captura de carbono, contribución a la biodiversidad y comportamiento estructural— determinan su desempeño dentro del sistema de infraestructura verde.

La articulación entre estos componentes permite optimizar la provisión de servicios ecosistémicos, minimizar conflictos con la infraestructura urbana y fortalecer la resiliencia del sistema verde frente a condiciones ambientales cambiantes. En este sentido, la selección de especies se consolida como un instrumento estratégico de planificación, orientado no solo a la configuración del paisaje urbano, sino también al funcionamiento ecológico integral de la ciudad.

10.69821/978-628-97750-2-0

CAPÍTULO X

Gestión, monitoreo y mantenimiento a largo plazo del arbolado urbano

El establecimiento exitoso de la infraestructura verde urbana (IVU) no culmina con la selección estratégica de especies, sino que se consolida mediante una gestión técnica sostenida en el tiempo. Mientras que en el capítulo precedente se definieron los criterios funcionales para la priorización de especies en función de su escala estructural, resiliencia climática y compatibilidad espacial, el presente capítulo aborda la dimensión operativa que permite garantizar la estabilidad mecánica, el desempeño ecosistémico y la seguridad pública a lo largo del ciclo de vida del arbolado urbano.

El arbolado urbano se desarrolla bajo condiciones ambientales de alta exigencia, definidas por precipitaciones intensas, periodos recurrentes de saturación del suelo, eventos de viento asociados a tormentas convectivas y una presión antrópica constante. Este conjunto de factores incrementa la susceptibilidad a fallas estructurales, particularmente en individuos con sistemas radiculares restringidos o con defectos biomecánicos preexistentes. La interacción entre cargas dinámicas de viento y la reducción de la resistencia del sistema raíz–suelo constituye un elemento crítico en la estabilidad arbórea, tal como ha sido documentado en estudios especializados sobre comportamiento estructural bajo condiciones de carga variable (Peltola, 2006; James et al., 2006).

Desde una perspectiva institucional, la gestión del arbolado en Panamá se encuentra regulada por el Ministerio de Ambiente (MiAmbiente), en el marco de la Ley 8 de 2015, y por disposiciones municipales como el Acuerdo Municipal N.º 91 de 2016, que establece los lineamientos para el manejo del arbolado público en el distrito de Panamá. Adicionalmente, la Resolución N.º DM-0055-2020 de

MiAmbiente regula los procedimientos para la poda, tala y trasplante, exigiendo evaluaciones técnicas previas para cualquier intervención.

La gestión del arbolado urbano se concibe como un proceso dinámico, interdisciplinario y adaptativo que integra principios de silvicultura urbana, biomecánica vegetal y planificación territorial. Este enfoque reconoce al arbolado como un componente estratégico de la infraestructura verde, en concordancia con los lineamientos propuestos por la FAO (2016, 2022), así como con la literatura científica que destaca su contribución a la mitigación del cambio climático y a la mejora del bienestar urbano (Nowak et al., 2014; IPCC, 2022).

10.1 Enfoque de gestión adaptativa en el arbolado urbano

La gestión del arbolado urbano debe concebirse como un sistema integrado que articula planificación, inventario, monitoreo e intervención continua. Este enfoque reconoce que el árbol es un organismo vivo inserto en un sistema urbano complejo, donde su desempeño depende tanto de factores biológicos como de condiciones ambientales y decisiones de manejo.

El carácter adaptativo de la gestión implica que las estrategias deben ajustarse en función del comportamiento observado del arbolado y de los cambios en el entorno urbano. Este principio ha sido ampliamente respaldado en la literatura de silvicultura urbana, donde se enfatiza la necesidad de sistemas de gestión basados en evidencia y retroalimentación continua (Livesley et al., 2016).

La diferenciación por categorías funcionales permite optimizar la asignación de recursos y priorizar intervenciones. Las especies estructurantes de gran sombra, debido a su elevada biomasa, presentan mayor potencial de impacto en caso de falla, lo que exige esquemas de monitoreo más rigurosos. Por otro lado, las especies de menor porte requieren un manejo orientado a evitar conflictos con la infraestructura urbana, particularmente en corredores eléctricos. Este enfoque se alinea con el principio de planificación preventiva promovido por Konijnendijk (2021) a través de la regla 3-30-300, que enfatiza la distribución estratégica del arbolado en las ciudades.

10.2 Inventario arbóreo y sistemas de información

El inventario arbóreo constituye la base técnica de la gestión del arbolado urbano, al permitir estructurar un conjunto de individuos como un sistema gestionable, cuantificable y trazable. Su relevancia ha sido ampliamente documentada como un elemento fundamental para la planificación, el monitoreo y la evaluación del arbolado urbano (Nowak et al., 2014).

Un inventario robusto integra información georreferenciada, variables dendrométricas, condición fisiológica y estado estructural. Esta base de datos permite establecer prioridades de intervención, optimizar la asignación de recursos y mejorar la eficiencia en la toma de decisiones, particularmente en entornos urbanos de alta densidad.

En Panamá, el Acuerdo Municipal N.º 91 de 2016 establece la necesidad de registrar y evaluar el arbolado público previo a cualquier intervención, lo que consolida al inventario como una herramienta técnica y normativa dentro del proceso de gestión.

La incorporación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite vincular el arbolado con otras capas de infraestructura urbana, facilitando la identificación de áreas críticas, el análisis espacial del riesgo y la planificación estratégica de intervenciones. Este enfoque ha sido reconocido como una práctica esencial en la gestión contemporánea de la infraestructura verde (FAO, 2016).

10.3 Monitoreo estructural y evaluación periódica

El monitoreo estructural se fundamenta en la comprensión del árbol como un sistema biomecánico integrado raíz–fuste–copa, cuya estabilidad depende de la interacción entre la arquitectura aérea y las condiciones de anclaje radicular. Este enfoque permite identificar de manera temprana defectos estructurales y condiciones que incrementan la probabilidad de falla.

La frecuencia del monitoreo debe ajustarse a las condiciones climáticas y al nivel de exposición del arbolado. Durante periodos de alta precipitación, la saturación

del suelo reduce la resistencia al anclaje radicular, incrementando la susceptibilidad al volcamiento, fenómeno ampliamente documentado en estudios biomecánicos (Peltola, 2006).

La evaluación del riesgo arbóreo se sustenta en metodologías estandarizadas, como las desarrolladas por la International Society of Arboriculture (ISA), que integran la probabilidad de falla, la probabilidad de impacto y la magnitud de las consecuencias (Dunster et al., 2017). Este enfoque permite una toma de decisiones objetiva, consistente y proporcional al nivel de riesgo.

En Panamá, la Resolución N.º DM-0055-2020 establece que toda intervención sobre el arbolado debe estar respaldada por una evaluación técnica, lo que refuerza el papel del monitoreo sistemático como base para una gestión fundamentada y trazable

10.4 Mantenimiento silvicultural preventivo

El mantenimiento preventivo se fundamenta en la anticipación de fallas estructurales y en la aplicación de intervenciones oportunas que favorezcan el desarrollo adecuado del árbol. Este enfoque es consistente con los principios de arboricultura moderna, que promueven la mínima intervención necesaria y el respeto por la fisiología del árbol (Gilman, 2012).

La poda, cuando se realiza correctamente, contribuye a mejorar la arquitectura del árbol y a reducir cargas estructurales. Sin embargo, intervenciones inadecuadas pueden generar efectos adversos, como el desarrollo de brotes epicórmicos y la alteración de la distribución de cargas, lo que incrementa el riesgo de falla (Shigo, 1984; James et al., 2018).

Un aspecto crítico es la gestión del sistema radical y del suelo. La compactación y la impermeabilización del suelo urbano limitan la oxigenación radicular, favoreciendo el desarrollo de raíces superficiales y reduciendo la estabilidad del árbol. Livesley et al. (2016) destacan que la calidad del suelo es uno de los factores más determinantes en el desempeño del arbolado urbano.

10.5 Protocolos de intervención ante riesgo

La intervención ante riesgo debe regirse por el principio de proporcionalidad, ajustando la intensidad de la acción al nivel de riesgo identificado. Este enfoque permite evitar intervenciones innecesarias y priorizar la conservación del árbol cuando sea viable.

Las metodologías de evaluación de riesgo, como las desarrolladas por la ISA, permiten clasificar el nivel de riesgo y definir las acciones correspondientes (Dunster et al., 2017). Estas pueden variar desde intervenciones menores hasta la remoción del individuo en casos críticos.

La normativa panameña establece que la tala solo puede realizarse bajo autorización y cuando el riesgo es inminente, lo que refuerza la necesidad de evaluaciones técnicas rigurosas y documentadas.

10.6 Indicadores de desempeño ecosistémico

La gestión del arbolado urbano debe evaluarse mediante indicadores que permitan medir su desempeño en términos ecológicos y operativos. Entre los indicadores más relevantes se encuentran la cobertura arbórea, la captura de carbono, la regulación microclimática y la eficiencia operativa.

Nowak et al. (2014) destacan que el arbolado urbano contribuye significativamente a la captura de carbono y a la mejora de la calidad del aire, mientras que el IPCC (2022) reconoce su papel en la mitigación del cambio climático y la adaptación urbana.

La incorporación de indicadores permite evaluar la efectividad de las políticas de gestión y ajustar las estrategias en función de los resultados obtenidos.

10.7 Modelo operativo municipal y coordinación institucional

La gestión del arbolado urbano requiere una estructura institucional sólida que garantice la continuidad, coherencia y eficacia de las acciones en el tiempo. La articulación entre el Ministerio de Ambiente y el Municipio de Panamá resulta

clave para alinear la política ambiental con la gestión operativa a escala local, asegurando consistencia en la toma de decisiones.

Uno de los principales retos se presenta en la interacción con las redes eléctricas, donde prácticas de poda no estandarizadas han generado alteraciones estructurales en el arbolado. La implementación de protocolos de coordinación interinstitucional, junto con programas de capacitación técnica, constituye una medida esencial para mejorar la calidad de las intervenciones y reducir impactos negativos sobre la estabilidad del árbol.

La incorporación de auditorías técnicas y esquemas de evaluación continua permite ajustar criterios de selección, manejo e intervención en función del desempeño observado. Este enfoque fortalece la capacidad adaptativa del sistema y contribuye a una gestión más eficiente y sostenible de la infraestructura verde urbana.

La consolidación del arbolado urbano como infraestructura verde se sustenta en la integración de criterios técnicos, comprensión biomecánica y marcos normativos coherentes. En Panamá, esta integración adquiere especial relevancia debido a la interacción entre condiciones ambientales y dinámicas urbanas, lo que exige modelos de gestión adaptativos, basados en evidencia científica y respaldados por instrumentos regulatorios. Bajo este enfoque, el arbolado urbano se configura como un componente estructural del sistema urbano, con un papel determinante en la resiliencia y la sostenibilidad territorial.

10.69821/978-628-97750-2-0

CONSIDERACIONES FINALES Y PERSPECTIVAS

El árbol urbano constituye uno de los componentes más relevantes dentro de la infraestructura verde contemporánea, debido a que su presencia y funcionamiento influyen directamente sobre la calidad ambiental, el equilibrio ecológico y el bienestar de la población. Su importancia trasciende ampliamente el valor estético o paisajístico tradicional, al participar activamente en procesos relacionados con la regulación térmica, la captura de carbono, la gestión del agua pluvial, la mejora de la calidad del aire y el mantenimiento de la biodiversidad urbana. En consecuencia, comprender al árbol como una infraestructura viva implica reconocer que su permanencia y funcionalidad dependen de procesos biológicos y estructurales complejos que interactúan continuamente con el entorno construido.

A lo largo de esta obra se evidencia que la gestión del árbol urbano requiere una visión integrada sustentada en principios de silvicultura urbana, biomecánica vegetal, evaluación del riesgo y planificación territorial. La interpretación del árbol como un sistema estructural y funcional permite comprender de manera más precisa su comportamiento frente a las condiciones ambientales y a las presiones derivadas de la dinámica urbana. Este enfoque favorece diagnósticos más consistentes, intervenciones más proporcionales y procesos de manejo ajustados a las necesidades reales de cada individuo y de su entorno.

La incorporación de metodologías estructuradas para la evaluación del riesgo ha permitido fortalecer la objetividad y la consistencia técnica en la toma de decisiones. La aplicación de criterios verificables contribuye a superar enfoques empíricos o basados exclusivamente en percepciones subjetivas, promoviendo una gestión más trazable y fundamentada. Bajo esta perspectiva, la seguridad pública

y la conservación del arbolado dejan de interpretarse como objetivos opuestos y pasan a integrarse dentro de un mismo proceso de planificación y manejo.

Asimismo, el análisis de los servicios ecosistémicos evidencia que los beneficios asociados al árbol urbano funcionan como un sistema interdependiente cuya efectividad depende de procesos adecuados de selección, establecimiento y mantenimiento. La relación entre especie y entorno urbano adquiere especial relevancia, ya que condiciona el desempeño estructural y funcional del árbol a largo plazo. La selección basada en criterios ecológicos, espaciales y biomecánicos permite reducir conflictos con infraestructura y optimizar los beneficios ambientales derivados de la infraestructura verde.

En el contexto de Panamá, la gestión del árbol urbano presenta desafíos particulares asociados a la variabilidad climática, las restricciones físicas del suelo y la creciente presión derivada de los procesos de urbanización. La combinación entre altas precipitaciones, temperaturas elevadas y eventos de viento exige enfoques adaptativos sustentados en conocimiento científico y respaldados por instrumentos técnicos y normativos que permitan fortalecer la planificación y la continuidad de las acciones de manejo.

El desarrollo futuro de la arboricultura urbana requerirá una integración cada vez mayor entre investigación científica, herramientas tecnológicas y procesos de gestión pública. El uso de Sistemas de Información Geográfica, sensores remotos, modelación ambiental y herramientas de análisis espacial representa una oportunidad importante para fortalecer los procesos de monitoreo, evaluación y toma de decisiones. Del mismo modo, la generación de información local sobre el comportamiento fisiológico y biomecánico de especies tropicales permitirá reducir incertidumbres y mejorar los criterios utilizados en la gestión del arbolado urbano.

La participación ciudadana y la formación técnica especializada también constituyen elementos fundamentales para consolidar modelos de gestión más sostenibles y eficientes. La comprensión del valor funcional y ambiental del árbol

urbano favorece procesos de corresponsabilidad social y fortalece la construcción de una cultura orientada hacia el manejo responsable de la infraestructura verde.

Finalmente, reconocer al árbol urbano como infraestructura estratégica implica incorporarlo de manera explícita dentro de las políticas de desarrollo urbano, adaptación climática y planificación territorial. Este enfoque permitirá avanzar hacia ciudades más resilientes, funcionales y ambientalmente sostenibles, donde la integración entre naturaleza y ciudad responda a principios de planificación responsable y visión de largo plazo.

Como parte de este proceso, la consolidación de modelos de gestión basados en evidencia científica representa una oportunidad para transformar la relación entre las ciudades y sus sistemas naturales, promoviendo espacios urbanos capaces de responder de manera más eficiente a los desafíos ambientales presentes y futuros.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS

Codex Alimentarius Commission. (2013). *Code of hygienic practice for fish and fishery products*. FAO/WHO.

Connell, J. J. (1995). *Control of fish quality* (4th ed.). Fishing News Books.

Dunster, J. A., Smiley, E. T., Matheny, N., & Lilly, S. (2017). *Tree risk assessment manual* (2nd ed.). International Society of Arboriculture.

Emborg, J., Dalgaard, P., & Ahrens, P. (2006). Impact of raw material on the microbial spoilage of lightly preserved seafood. *Journal of Food Protection*, 69(10), 2482–2491. https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.10.2482

FAO. (2016). *Directrices sobre silvicultura urbana y periurbana*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022: Towards blue transformation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ghaly, A. E., Dave, D., Budge, S., & Brooks, M. S. (2010). Fish spoilage mechanisms and preservation techniques: Review. *American Journal of Applied Sciences*, 7(7), 859–877. https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.859.877

Gilman, E. F. (2012). *An illustrated guide to pruning* (3rd ed.). Delmar.

Gram, L., & Dalgaard, P. (2002). Fish spoilage bacteria: Problems and solutions. *Current Opinion in Biotechnology*, 13(3), 262–266. https://doi.org/10.1016/S0958-1669(02)00309-9

Huss, H. H. (1995). *Quality and quality changes in fresh fish*. FAO Fisheries Technical Paper No. 348.

IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.

James, K., Haritos, N., & Ades, P. (2006). Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany*, 93(10), 1522–1530. https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1522

James, K., Dahle, G., Grabosky, J., Kane, B., & Detter, A. (2018). Tree biomechanics and risk assessment. *Arboriculture & Urban Forestry*, 44(1), 1–15.

Konijnendijk, C. (2021). The 3–30–300 rule for urban forestry. *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 126878. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126878

Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The urban forest and ecosystem services. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2078–2087. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.004

Ministerio de Ambiente de Panamá. (2015). *Ley No. 8 de 25 de marzo de 2015, que crea el Ministerio de Ambiente e incluye disposiciones sobre cambio climático*. Gobierno de la República de Panamá.

Ministerio de Ambiente de Panamá. (2020). *Resolución N.° DM-0055-2020, por la cual se regulan los procedimientos de poda, tala y trasplante de especies arbóreas*. Ministerio de Ambiente de Panamá.

Mozaffarian, D., & Rimm, E. B. (2006). Fish intake, contaminants, and human health: Evaluating the risks and benefits. *JAMA*, 296(15), 1885–1899. https://doi.org/10.1001/jama.296.15.1885

Municipio de Panamá. (2016). *Acuerdo Municipal N.° 91 de 19 de abril de 2016, por el cual se dictan medidas sobre los recursos forestales y el arbolado público del distrito de Panamá*. Consejo Municipal de Panamá.

Municipio de Panamá. (2018). *Guía 1: Plantación, cuidado y protección del arbolado urbano*. Dirección de Gestión Ambiental, Municipio de Panamá.

Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2014). Air pollution removal by urban trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3–4), 115–123. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2004.01.001

Peltola, H. (2006). Mechanical stability of trees under wind and snow loads. *Forest Ecology and Management*, 135(1–3), 143–153. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00310-2

Shigo, A. L. (1984). *Tree decay and CODIT*. USDA Forest Service.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2022). *Plant physiology and development* (7th ed.). Sinauer Associates.

10.69821/978-628-97750-2-0

ANEXOS

ANEXO A

Formato técnico de inventario y evaluación del arbolado urbano

A.1 Instrucciones generales de uso

El presente formato fue diseñado para estandarizar el levantamiento técnico del arbolado urbano en la Ciudad de Panamá bajo un enfoque de evaluación proporcional del riesgo. Su aplicación debe ser realizada por personal capacitado en arboricultura urbana, considerando principios biomecánicos, sanitarios y de exposición urbana desarrollados en este libro.

El formulario no sustituye la inspección avanzada cuando esta sea requerida, sino que constituye el instrumento base de inspección visual estructurada (Visual Tree Assessment – VTA).

FORMATO DE INVENTARIO Y EVALUACIÓN

1. Identificación del sitio

- Código de árbol: _____
- Fecha de evaluación: _____
- Evaluador técnico: _____
- Distrito / Corregimiento: _____
- Dirección exacta o referencia: _____
- Coordenadas GPS: _____

- Tipo de espacio:
  ☐ Parque
  ☐ Avenida
  ☐ Acera
  ☐ Plaza
  ☐ Residencial
  ☐ Institucional
  ☐ Otro: _____

2. Identificación dendrológica

- Nombre común: _____
- Nombre científico: _____
- Origen:
  ☐ Nativa
  ☐ Introducida
- Estado fenológico:
  ☐ Vegetativo
  ☐ Floración
  ☐ Fructificación
  ☐ Defoliación parcial

3. Variables dendrométricas

- DAP (cm): _____
- Altura total (m): _____
- Diámetro de copa (m): _____
- Inclinación del fuste (° aprox.): _____

- Edad estimada:
  ☐ Juvenil
  ☐ Adulto joven
  ☐ Adulto maduro
  ☐ Senescente

4. Evaluación estructural

4.1 Sistema radical y zona de anclaje

☐ Raíces expuestas

☐ Suelo levantado

☐ Compactación evidente

☐ Daño por obra civil

☐ Cavidades basales

☐ Sin defectos visibles

Observaciones:

4.2 Fuste

☐ Grietas longitudinales

☐ Cavidades

☐ Pudrición visible

☐ Unión codominante con inclusión de corteza

☐ Heridas mal cicatrizadas

☐ Sin defectos visibles

Observaciones:

10.69821/978-628-97750-2-0

4.3 Copa

☐ Ramas muertas de gran diámetro

☐ Descope previo

☐ Brotación epicórmica abundante

☐ Desequilibrio estructural

☐ Interferencia con infraestructura aérea

☐ Sin defectos visibles

Observaciones:

5. Evaluación sanitaria

☐ Presencia de hongos xilófagos

☐ Plagas visibles

☐ Clorosis generalizada

☐ Defoliación anormal

☐ Sin síntomas relevantes

Observaciones:

10.69821/978-628-97750-2-0

6. Exposición urbana

Área de posible impacto:

☐ Alta circulación peatonal

☐ Escuela / Hospital

☐ Vía vehicular principal

☐ Infraestructura crítica

☐ Baja exposición

Nivel estimado de exposición:

☐ Alta

☐ Media

☐ Baja

7. Valoración preliminar de riesgo

Probabilidad de falla estimada:

☐ Baja

☐ Moderada

☐ Alta

Consecuencia potencial:

☐ Menor

☐ Significativa

☐ Grave

Nivel de prioridad:

☐ Monitoreo rutinario

☐ Intervención programada

☐ Intervención prioritaria

☐ Evaluación avanzada requerida

8. Recomendación técnica

☐ Sin intervención

☐ Poda de formación

☐ Poda de reducción selectiva

☐ Instalación de soporte estructural

☐ Evaluación instrumental adicional

☐ Tala justificada (requiere autorización ambiental)

Justificación técnica:

---

9. Seguimiento

Fecha de próxima inspección sugerida: _____

Observaciones adicionales: _____

Firma del evaluador: _____

MATRIZ SIMPLIFICADA DE PRIORIZACIÓN (Anexo A.2)

Probabilidad	**Consecuencia**	**Prioridad**
Baja	Menor	Monitoreo rutinario
Moderada	Menor	Programada
Moderada	Significativa	Prioritaria

Probabilidad	Consecuencia	Prioridad
Alta	Cualquiera	Intervención inmediata

ANEXO B

Protocolo avanzado de evaluación proporcional del riesgo arbóreo

B.1 Principios metodológicos

El presente protocolo se fundamenta en el modelo internacional de evaluación de riesgo arbóreo basado en tres componentes centrales:

1. Probabilidad de falla
2. Probabilidad de impacto (exposición)
3. Consecuencia del impacto

La integración de estos factores permite establecer una valoración proporcional del riesgo y orientar decisiones técnicas coherentes con el principio de mínima intervención y seguridad pública**.**

B.2 Secuencia metodológica avanzada

Evaluación estructurada en cuatro fases:

Observación técnica → Diagnóstico estructural → Análisis de exposición → Determinación de riesgo proporcional → Recomendación documentada.

B.3 MATRIZ AVANZADA DE VALORACIÓN DEL RIESGO

1. PROBABILIDAD DE FALLA

Evaluar defecto estructural dominante y su severidad.

Categoría	Descripción técnica
Improbable	Sin defectos estructurales significativos.
Posible	Defecto leve sin evidencia de progresión activa.
Probable	Defecto estructural moderado con signos de deterioro.
Inminente	Falla parcial visible o deterioro avanzado.

Factores que considerar:

- Espesor residual de madera sana
- Presencia de pudrición activa
- Inclinación progresiva
- Saturación estacional del suelo
- Inclusión de corteza en uniones codominantes

2. PROBABILIDAD DE IMPACTO (EXPOSICIÓN)

Determinar frecuencia de ocupación del área objetivo.

Nivel	Descripción
Baja	Área ocasionalmente ocupada.
Media	Uso intermitente frecuente.
Alta	Ocupación constante (escuelas, hospitales, avenidas).

En Panamá debe considerarse adicionalmente:

- Densidad peatonal

- Infraestructura crítica
- Temporada lluviosa
- Eventos masivos

3. CONSECUENCIA POTENCIAL

Evaluar magnitud del daño esperado.

Nivel	**Descripción**
Menor	Daños materiales menores.
Significativa	Lesión posible o daño estructural relevante.
Grave	Lesiones severas o riesgo de fatalidad.

Factores estructurales:

- Tamaño del elemento que puede fallar
- Altura de caída
- Diámetro de la rama/fuste
- Materialidad circundante

B.4 MATRIZ INTEGRADA DE RIESGO

Riesgo = Probabilidad de falla × Probabilidad de impacto × Consecuencia

Clasificación final:

Resultado	**Nivel de riesgo**	**Acción recomendada**
Bajo	Riesgo tolerable	Monitoreo periódico

Resultado	Nivel de riesgo	Acción recomendada
Moderado	Riesgo manejable	Intervención programada
Alto	Riesgo significativo	Mitigación prioritaria
Crítico	Riesgo inaceptable	Intervención inmediata

B.5 Factores tropicales específicos incorporados

Este modelo incluye variables que no siempre están presentes en protocolos de clima templado:

- Saturación temporal del suelo durante temporada lluviosa
- Intensidad de tormentas convectivas
- Crecimiento acelerado y brotación vigorosa
- Interferencia con redes aéreas frecuentes en Panamá
- Compactación urbana y limitación radicular

Estas variables deben ser consideradas explícitamente en la estimación de probabilidad de falla.

B.6 Criterios para intervención

La decisión técnica debe documentar:

1. Defecto dominante
2. Nivel de riesgo estimado
3. Alternativas de mitigación
4. Justificación biomecánica

5. Coherencia normativa (si aplica permiso ambiental)

B.7 Nivel de documentación requerido

Dependiendo del riesgo:

- Bajo → Registro básico en inventario
- Moderado → Fotografía y ficha técnica
- Alto → Informe técnico estructurado
- Crítico → Informe técnico + notificación institucional

ANEXO C

Protocolo técnico para la ejecución de poda en arbolado urbano

C.1 Principios generales

La poda en arbolado urbano debe ejecutarse como intervención técnica justificada y documentada, basada en fundamentos fisiológicos, biomecánicos y de seguridad pública. No constituye una práctica estética rutinaria, sino una acción estructural que modifica la arquitectura del árbol y puede alterar su estabilidad a mediano y largo plazo.

Toda intervención deberá:

- Derivarse de un diagnóstico previo documentado.
- Ser proporcional al riesgo identificado.
- Respetar los mecanismos de compartimentación natural del árbol.
- Ajustarse al marco normativo vigente en Panamá.

- Minimizar superficie de herida y alteración de biomasa funcional.

C.2 Clasificación técnica de podas permitidas

1. Poda de formación

Aplicable en árboles juveniles.
Objetivo: desarrollar eje dominante estable, eliminar uniones defectuosas tempranas y orientar arquitectura estructural futura.

Debe:

- Priorizar cortes menores a 5 cm de diámetro.
- Mantener dominancia apical.
- Evitar eliminación excesiva de copa.

2. Poda sanitaria

Objetivo: remover ramas muertas, fracturadas o infectadas.

Debe:

- Eliminar material deteriorado hasta tejido sano.
- Aplicar método de tres cortes en ramas de gran diámetro.
- Evitar ampliación innecesaria de heridas.

3. Poda de reducción estructural selectiva

Aplicable cuando existe sobrecarga localizada o interferencia específica.

Debe:

- No superar 20–30 % de la copa en una intervención.
- Respetar ramificación lateral funcional.
- Mantener equilibrio entre masa aérea y sistema radicular.

4. Poda de despeje o interferencia

Aplicable en conflictos con infraestructura aérea.

Debe:

- Realizar reducción dirigida, no descope.
- Mantener estructura natural.
- Documentar motivo técnico.

C.3 Prácticas expresamente prohibidas

- Descope o “topping”
- Corte al ras del tronco eliminando collar
- Dejar tocones prolongados
- Aplicación rutinaria de pastas cicatrizantes
- Eliminación de más del 30 % de la copa sin justificación estructural

C.4 Técnica correcta de corte

C.4.1 Ubicación del corte

El corte debe ejecutarse inmediatamente por fuera del collar de la rama, respetando el tejido especializado que facilita la compartimentación (modelo CODIT).

Nunca:

- Cortar dentro del collar
- Cortar al ras del tronco
- Dejar muñón

C.4.2 Método de tres cortes (ramas > 5 cm)

1. Corte inferior de alivio (muesca)
2. Corte superior externo
3. Eliminación final del tocón residual

Objetivo: evitar desgarros de corteza y daños al cambium.

C.5 Límites técnicos recomendados

- Diámetro máximo de corte recomendado: < 10 cm cuando sea posible.
- Remoción máxima de copa: 25 % como referencia general.
- Intervalo mínimo entre intervenciones severas: 3–5 años.

C.6 Condiciones tropicales específicas

En la Ciudad de Panamá debe considerarse:

- Evitar podas extensas inmediatamente antes de temporada lluviosa.
- Considerar saturación del suelo al evaluar estabilidad post-poda.
- Evaluar crecimiento acelerado y brotación vigorosa posterior.
- Priorizar formación temprana para reducir intervenciones tardías.

C.7 Documentación obligatoria

Toda poda debe registrar:

- Justificación técnica
- Tipo de intervención
- Porcentaje estimado de copa removida
- Fecha

- Evaluador responsable
- Evidencia fotográfica (antes/después)

C.8 Matriz de decisión para poda

Condición estructural	**Nivel de exposición**	**Acción recomendada**
Rama muerta menor	Baja	Monitoreo
Rama muerta mayor en zona alta exposición	Alta	Poda prioritaria
Unión codominante leve	Media	Formación selectiva
Desbalance severo con alta exposición	Alta	Reducción estructural programada

10.69821/978-628-97750-2-0

GLOSARIO

El presente glosario reúne los principales términos técnicos utilizados en el libro, con el propósito de facilitar la comprensión conceptual y asegurar la coherencia terminológica en el análisis del arbolado urbano como infraestructura verde en contextos tropicales.

Arbolado urbano

Conjunto de individuos arbóreos que se desarrollan en espacios urbanos y periurbanos, formando parte de la infraestructura verde y contribuyendo a la provisión de servicios ecosistémicos, regulación climática y calidad ambiental (FAO, 2016; Nowak et al., 2014).

Anisotropía

Propiedad mecánica de los materiales biológicos, como la madera, que presentan comportamiento estructural diferenciado según la dirección de las fibras, lo cual condiciona la resistencia y respuesta del árbol frente a cargas externas (Niklas, 1992).

Biomasa arbórea

Cantidad total de materia orgánica acumulada en un árbol, incluyendo fuste, ramas, hojas y raíces, estrechamente relacionada con la captura y almacenamiento de carbono (Nowak et al., 2014).

Brotación epicórmica

Emisión de brotes a partir de yemas latentes ubicadas en el fuste o ramas principales, generalmente inducida por estrés, poda severa o pérdida de dominancia apical, lo que puede alterar la estabilidad estructural del árbol (Gilman, 2012).

Carga dinámica

Fuerza variable en el tiempo, generalmente asociada al viento, que genera oscilaciones en la estructura del árbol, provocando esfuerzos alternantes de tracción y compresión (Peltola, 2006; James et al., 2006).

Carga estática

Fuerza constante aplicada sobre el árbol, como el peso propio de la biomasa o cargas permanentes, que influye en la distribución de esfuerzos estructurales.

CODIT (Compartmentalization of Decay in Trees)

Modelo que describe los mecanismos mediante los cuales los árboles limitan la propagación de la descomposición interna mediante barreras anatómicas y químicas, manteniendo la integridad estructural (Shigo, 1984).

Compactación del suelo

Proceso mediante el cual el suelo pierde porosidad debido a presión mecánica, reduciendo la aireación y el crecimiento radicular, lo que afecta la estabilidad del árbol (Day et al., 2010; Livesley et al., 2016).

DAP (Diámetro a la Altura del Pecho)

Medida dendrométrica estándar tomada a 1.3 m del suelo, utilizada para estimar tamaño, biomasa y crecimiento del árbol.

Defecto estructural

Alteración física o morfológica en la estructura del árbol que puede comprometer su estabilidad, incluyendo cavidades, grietas, uniones débiles o inclinaciones anómalas.

Evaluación de riesgo arbóreo

Proceso sistemático que analiza la probabilidad de falla, la probabilidad de impacto y la severidad de las consecuencias, con el fin de determinar el nivel de riesgo asociado a un árbol (Dunster et al., 2017).

Exposición (en riesgo arbóreo)

Probabilidad de que un elemento (persona, infraestructura o vehículo) se encuentre dentro del área de impacto potencial en caso de falla del árbol.

Infraestructura verde

Red de espacios naturales y seminaturales que proporcionan servicios ecosistémicos, incluyendo el arbolado urbano como componente estructural clave (Benedict & McMahon, 2006; FAO, 2016).

Intervención silvicultural

Conjunto de acciones técnicas aplicadas al arbolado urbano, como poda, tratamiento sanitario o sustitución, orientadas a mejorar su condición estructural y funcional.

Madera de reacción

Tejido leñoso especializado que los árboles desarrollan para compensar tensiones mecánicas, permitiendo estabilizar su estructura frente a inclinaciones o cargas asimétricas (Niklas, 1992).

Matriz de riesgo

Herramienta analítica que integra probabilidad de falla, exposición y consecuencias para clasificar el nivel de riesgo y orientar decisiones de manejo.

Poda de formación

Intervención temprana orientada a desarrollar una estructura estable, eliminando defectos y promoviendo una arquitectura equilibrada.

Poda de reducción

Intervención destinada a disminuir la carga estructural de la copa mediante la reducción selectiva de ramas, manteniendo la integridad del árbol.

Poda sanitaria

Eliminación de tejido muerto, enfermo o dañado con el fin de mejorar la salud y seguridad del árbol.

Probabilidad de falla

Estimación de la posibilidad de que un árbol o parte de él colapse, considerando su condición estructural y factores ambientales.

Resiliencia arbórea

Capacidad del árbol para resistir, adaptarse y recuperarse frente a perturbaciones ambientales o antrópicas (IPCC, 2022).

Saturación del suelo

Condición en la cual el suelo se encuentra completamente lleno de agua, reduciendo la resistencia al anclaje radicular y aumentando el riesgo de volcamiento (Peltola, 2006).

Sección resistente

Porción del fuste o rama que conserva integridad estructural y capacidad de soportar cargas, particularmente relevante en árboles con cavidades.

Sistema raíz–fuste–copa

Modelo estructural integrado que describe la interacción entre las partes del árbol como un sistema biomecánico único, determinante de su estabilidad.

Servicios ecosistémicos

Beneficios que los ecosistemas proporcionan a la sociedad, incluyendo regulación climática, captura de carbono, control hidrológico y mejora de la calidad del aire (Nowak et al., 2014; IPCC, 2022).

10.69821/978-628-97750-2-0

VTA (Visual Tree Assessment)

Método de evaluación visual desarrollado para identificar defectos estructurales en árboles, basado en la observación de síntomas externos que reflejan condiciones internas (Mattheck & Breloer, 1994).

10.69821/978-628-97750-2-0

Derechos de Autor (Copyright) 2026 © Lourdes Rubatino Santizo, Francisco Farnum Castro, Edgardo Gutiérrez y Wendy Requena

Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0.

Usted es libre de compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, así como de adaptarlo, remezclarlo, transformarlo y crear a partir de él para cualquier propósito, incluso con fines comerciales. Sin embargo, debe cumplir con la condición de atribución, lo que significa que debe otorgar el crédito correspondiente a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se han realizado modificaciones. Puede hacerlo en cualquier formato razonable, pero no de manera que sugiera que cuenta con el respaldo del licenciante o que recibe algún beneficio por el uso de la obra.

Resumen de licencia – Texto completo de la licencia

ISBN: 978-628-97750-2-0

Cómo citar

Rubatino Santizo, L., Farnum Castro, F., Gutiérrez, E., & Requena, W. (2026). *El árbol urbano como infraestructura viva: Bases científicas para la gestión y evaluación del riesgo arbóreo en la Ciudad de Panamá*. Editorial PLAGCIS. https://doi.org/10.69821/978-628-97750-2-0

10.69821/978-628-97750-2-0

Esta obra se publicó en primera edición durante el año 2026, como resultado de la colaboración entre instituciones comprometidas con la difusión del conocimiento académico.

El proceso editorial fue desarrollado por el Fondo Editorial PLAGCIS, perteneciente a la Plataforma de acción, gestión, e investigación social S.A.S. Sincelejo, Sucre, con el respaldo y auspicio en alianza con la Universidad INCCA de Colombia bajo el convenio marco de cooperación, firmado el 18 de junio del 2025 y con el Tecnológico Universitario Edupraxis, Ecuador.

La edición se finalizó en Sincelejo, Colombia, consolidando el compromiso interinstitucional por la divulgación de investigaciones de alto impacto en el ámbito educativo y cultural.