aeet
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ECOLOGÍA TERRESTRE

Ecosistemas 35(3): 3215 [septiembre - diciembre/ Sept. – Dec., 2026]
https://doi.org/10.7818/ECOS.3215

Editora asociada / Associate editor: Susana Pallarés

ARTÍCULO DE REVISIÓN / REVIEW ARTICLE

ecosistemas

ISSN 1697-2473

Open access / CC BY-NC 4.0

www.revistaecosistemas.net

Lo que nos dice el APTI: una revisión sobre la tolerancia de la vegetación urbana a la contaminación atmosférica y la aplicación del índice en la selección de especies

Ingrith Angélica Zárate-Caballero[1,2,3,*], Mery-Helen Tíjaro-Orejuela[2,3], Julián Yessid Arias-Pineda[4]

(1) Semillero de investigación BIOMA, Universidad INCCA de Colombia, 110311, Bogotá, Colombia.
(2) Semillero de investigación Floramyces Research. Grupo de Investigación en Biogeografía y Ecología Evolutiva Neotropical (BEEN), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 111711, Bogotá, Colombia.
(3) Grupo de Investigación en Ecología y Conservación de plantas de Colombia (GIEPEC), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 111611, Bogotá, Colombia.
(4) Grupo de Investigación en Artrópodos y otros grupos (KUMANGUI), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 111611, Bogotá, Colombia.

* Autora de correspondencia / Corresponding author: I. A. Zárate-Caballero [ingrithzar@hotmail.com]

> Recibido / Received: 24/02/2026 – Aceptado / Accepted: 31/07/2026

Cómo citar / How to cite: Zarate-Caballero, I. A., Tijaro-Orejuela, M. H., & Arias-Pineda, J. Y. (2026). Lo que nos dice el APTI: una revisión sobre la tolerancia de la vegetación urbana a la contaminación atmosférica y la aplicación del índice en la selección de especies. *Ecosistemas* 35(3): 3215. https://doi.org/10.7818/ECOS.3215

Lo que nos dice el APTI: una revisión sobre la tolerancia de la vegetación urbana a la contaminación atmosférica y la aplicación del índice en la selección de especies

Resumen: El Índice de Tolerancia a la Contaminación Atmosférica (APTI) ha sido ampliamente utilizado para evaluar la respuesta fisiológica de las plantas frente a ambientes contaminados; sin embargo, persisten vacíos de conocimiento sobre los patrones taxonómicos, funcionales y fisiológicos asociados con la tolerancia vegetal. El objetivo de este estudio fue analizar de manera sistemática la aplicación del APTI en la literatura científica publicada entre 2015 y 2025.

Se realizó una revisión bibliográfica con enfoque cuantitativo siguiendo la metodología PRISMA. La información recopilada fue analizada mediante estadística descriptiva y pruebas no paramétricas para comparar tipos de vegetación y ambientes contaminados y control. Se analizaron 64 estudios que reunieron 1817 registros correspondientes a 388 especies y 85 familias botánicas. Los resultados evidenciaron una marcada concentración geográfica de investigaciones en Asia y mostraron que las especies arbóreas presentaron mayores niveles de tolerancia que arbustos y herbáceas. El análisis de registros pareados reveló incrementos significativos del APTI en ambientes contaminados, asociados con aumentos del contenido de ácido ascórbico y del contenido relativo de agua, así como disminuciones de las clorofilas totales y del pH foliar. Además, 116 especies fueron clasificadas en más de una categoría de tolerancia, evidenciando una elevada plasticidad fisiológica.

Los resultados sugieren que la tolerancia a la contaminación atmosférica constituye una respuesta dinámica influenciada por las condiciones ambientales. En consecuencia, el APTI debe interpretarse como un indicador integrador de resiliencia fisiológica con potencial para apoyar el biomonitoreo ambiental y la gestión de la vegetación urbana bajo escenarios de cambio climático.

Palabras clave: ácido ascórbico; cambio climático; clorofilas totales; contaminación atmosférica; contenido relativo de agua; índice de tolerancia y resistencia a la contaminación

Insights from the Air Pollution Tolerance Index (APTI): A review of urban vegetation tolerance to air pollution and its application in species selection

Abstract: The Air Pollution Tolerance Index (APTI) has been widely used to assess plant physiological responses to polluted environments; however, important knowledge gaps remain regarding the taxonomic, functional, and physiological patterns associated with plant tolerance. The aim of this study was to systematically analyze the application of APTI in the scientific literature published between 2015 and 2025.

A quantitative literature review was conducted following PRISMA guidelines. The compiled information was analyzed using descriptive statistics and non-parametric tests to compare vegetation types and polluted versus control environments. A total of 64 studies were analyzed, comprising 1817 records corresponding to 388 species and 85 botanical families. The results revealed a marked geographical concentration of research in Asia and showed that tree species exhibited higher tolerance levels than shrubs and herbaceous plants. Paired comparisons revealed significantly higher APTI values in polluted environments, associated with increased ascorbic acid content and relative water content, as well as reduced total chlorophyll content and leaf pH. In addition, 116 species were classified into more than one tolerance category, highlighting a high degree of physiological plasticity.

© 2026 Los autores. [ECOSISTEMAS no se hace responsable del uso indebido de material sujeto a derecho de autor]
© 2026 The authors. [ECOSISTEMAS is not responsible for the misuse of copyrighted material]

These findings suggest that tolerance to air pollution constitutes a dynamic response influenced by environmental conditions rather than a fixed species trait. Consequently, APTI should be interpreted as an integrative indicator of physiological resilience with potential applications in environmental biomonitoring and urban vegetation management under climate change scenarios.

Keywords: ascorbic acid; atmospheric pollution; climate change; relative water content; total chlorophylls; Air Pollution Tolerance Index

Introducción

Las ciudades se encuentran entre los ecosistemas más transformados por las actividades humanas y enfrentan simultáneamente múltiples factores de estrés asociados con la urbanización, el cambio climático y la contaminación atmosférica. El incremento de la temperatura global, las modificaciones en los regímenes de precipitación y la intensificación de eventos climáticos extremos están alterando el funcionamiento de los ecosistemas urbanos y afectando la calidad ambiental de las ciudades (Šola et al., 2025). En este contexto, la contaminación atmosférica constituye una de las principales amenazas ambientales debido a su estrecha relación con las emisiones antropogénicas y a sus efectos negativos sobre la salud humana, la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas (Zhu et al., 2022; Pinho-Gomes et al., 2023). La interacción entre contaminación atmosférica y cambio climático genera procesos de retroalimentación que favorecen la acumulación de contaminantes y amplifican sus efectos sobre los organismos vivos, incluyendo la vegetación urbana (Bharti et al., 2018; Alizadeh y Hitchmough, 2019).

La vegetación urbana desempeña un papel fundamental en la mitigación de estos impactos al contribuir a la captura de contaminantes atmosféricos, la regulación térmica, la reducción del efecto de isla de calor urbana y el mantenimiento de la biodiversidad asociada (Kaur y Nagpal, 2017; Bharti et al., 2018; Russo et al., 2025). Sin embargo, la capacidad de las plantas para enfrentar las condiciones ambientales adversas presentes en los entornos urbanos no es uniforme (Achakzai et al., 2017). Las diferencias en rasgos morfológicos (Anand et al., 2022), anatómicos y fisiológicos determinan respuestas contrastantes frente a los contaminantes atmosféricos, generando distintos niveles de sensibilidad o tolerancia entre especies e incluso dentro de una misma especie bajo diferentes condiciones ambientales (Yadav y Pandey, 2020; Pandey et al., 2022).

La evaluación de estas respuestas fisiológicas ha cobrado especial relevancia debido a la necesidad de identificar especies capaces de persistir en ambientes urbanos sometidos a crecientes niveles de estrés ambiental. Entre las herramientas desarrolladas para este propósito, el Índice de Tolerancia a la Contaminación Atmosférica APTI (por sus siglas en ingles *Air Pollution Tolerance Index*) se ha consolidado como uno de los indicadores más utilizados para estimar la capacidad de respuesta de las plantas frente a la contaminación atmosférica (Rajakaruna y Masakorala, 2019; Roy et al., 2020). Este índice integra cuatro variables fisiológicas clave: el contenido de clorofilas totales, el pH foliar, el contenido relativo de agua (CRA) y el contenido de ácido ascórbico (Tripathi y Nema, 2023). En conjunto, estos parámetros reflejan procesos asociados con la actividad fotosintética, la regulación metabólica, el balance hídrico y los mecanismos antioxidantes que permiten a las plantas responder al estrés ambiental.

Las clorofilas constituyen indicadores directos de la capacidad fotosintética (Kaur y Nagpal, 2017; Lasinskas et al., 2021) y del estado fisiológico general de la planta usadas con frecuencia para evaluar el impacto de los contaminantes atmosféricos (Bharti et al., 2018), mientras que el pH foliar regula la sensibilidad vegetal a contaminantes (He et al., 2024). Por su parte, el contenido relativo de agua (CRA) de una hoja corresponde a la cantidad de agua presente en ella en relación con su estado de máxima turgencia (Lohe et al., 2015) y refleja la capacidad de mantener la hidratación celular y sostener funciones metabólicas esenciales bajo condiciones adversas (Sahu et al., 2020). Finalmente, el ácido ascórbico representa uno de los principales mecanismos antioxidantes presentes en los tejidos vegetales y desempeña un papel fundamental en la neutralización de especies reactivas de oxígeno (ROS) generadas por la exposición a contaminantes atmosféricos (Achakzai et al., 2017). La integración de estas variables permite que el APTI funcione como un indicador de la respuesta fisiológica vegetal frente al estrés ambiental.

Debido a su capacidad para integrar múltiples componentes fisiológicos, el APTI ha sido ampliamente utilizado para clasificar especies según su grado de tolerancia o sensibilidad, apoyar programas de biomonitoreo ambiental y orientar la selección de especies para proyectos de arborización urbana e infraestructura verde (Aji et al., 2015; Patel y Kumar, 2018). Sin embargo, a pesar del creciente número de estudios publicados durante la última década, la información disponible permanece dispersa entre diferentes regiones geográficas, grupos taxonómicos y enfoques metodológicos. Esta heterogeneidad dificulta la identificación de patrones generales de respuesta vegetal y limita la comprensión de los mecanismos fisiológicos que determinan la tolerancia frente a la contaminación atmosférica.

Adicionalmente, persisten interrogantes sobre la consistencia de las clasificaciones de tolerancia entre especies, así como sobre la influencia de factores climáticos, ambientales y taxonómicos en la respuesta observada. Comprender estas variaciones resulta particularmente relevante en escenarios de cambio climático, donde la capacidad de adaptación de la vegetación urbana podría determinar el mantenimiento de funciones ecológicas esenciales y de los servicios ecosistémicos asociados.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar de manera sistemática la aplicación del índice APTI en la literatura científica de acceso abierto publicada entre 2015 y 2025, integrando evidencia cuantitativa para identificar patrones taxonómicos, funcionales y fisiológicos de tolerancia vegetal frente a la contaminación atmosférica. A través de esta síntesis se busca identificar patrones de variación en los valores del APTI reportados para diferentes especies vegetales y analizar cómo factores taxonómicos, fisiológicos y ambientales pueden influir en la respuesta registrada frente a la contaminación atmosférica. Asimismo, se discute el potencial del índice como herramienta para el biomonitoreo ambiental y la selección de especies para programas de arborización urbana.

Metodología

Esta investigación se desarrolló bajo un enfoque de revisión sistemática descriptiva, tomando como referencia algunas directrices metodológicas de la declaración PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) ampliamente utilizada para el reporte de revisiones sistemáticas. La revisión bibliográfica estuvo orientada al análisis del APTI como herramienta para evaluar la respuesta de la biota vegetal frente a la contaminación atmosférica analizando información proveniente de 64 artículos científicos de carácter experimental y acceso abierto, en los cuales se evaluó el índice APTI en distintas especies vegetales mediante estudios realizados en zonas urbanas y periurbanas a nivel mundial durante el periodo 2015-2025 (**Fig. 1**) considerando como entornos urbanos aquellos estudios realizados dentro de áreas urbanizadas, periurbanas o asociadas a corredores viales, zonas industriales y áreas verdes urbanas sometidas a influencia antrópica directa.

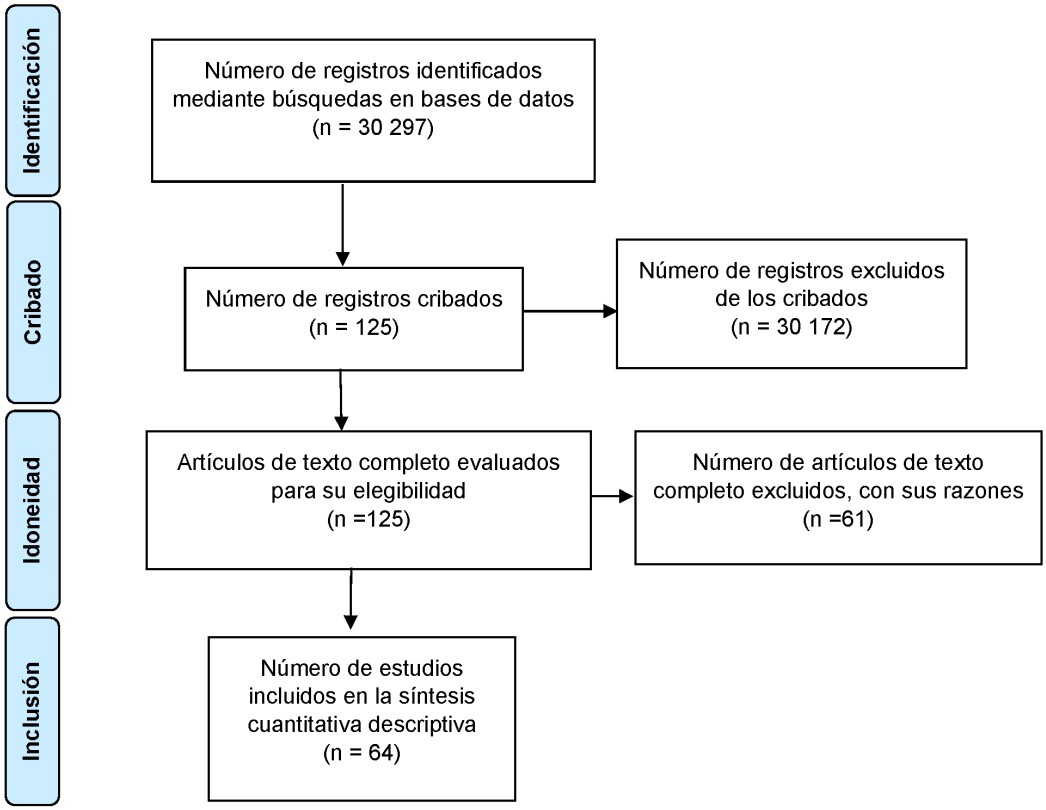


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de selección de estudios.

Figure 1. Flow diagram of the study selection process.

La búsqueda de información se realizó entre diciembre del 2025 y enero del 2026 en las bases de datos ScienceDirect, Web of Science, Google Scholar y PubMed, mediante el uso de ecuaciones de búsqueda formuladas con operadores booleanos ("Air Pollution Tolerance Index" OR APTI) AND (plant* OR vegetation OR tree* OR shrub*) de acuerdo con la **Tabla 1**.

A partir de la lectura y sistematización de los artículos seleccionados, se construyó una primera matriz bibliográfica que incluyó información general de cada estudio, como la revista de publicación, el identificador de objetos digital (DOI), autores, país de estudio, título del artículo y año de publicación. Adicionalmente, se elaboró una segunda matriz analítica, en la cual se integraron variables más detalladas, incluyendo número de artículo, listado de especies evaluadas, familia botánica, título del artículo, año, país, ciudad de estudio, tipo de vegetación, categoría de tolerancia, valor del índice APTI y su desviación estándar, además de variables fisiológicas asociadas como clorofilas totales (TC), pH foliar, contenido relativo de agua (CRA) y ácido ascórbico (AA), cada una registrada tanto en condiciones de contaminación como en los controles si se contaba con estos datos. Para las comparaciones entre ambientes, se consideraron como zonas contaminadas aquellas descritas en los estudios originales como áreas expuestas a emisiones vehiculares, industriales o urbanas con presencia de contaminantes atmosféricos. Las zonas control correspondieron a sitios de referencia con menor influencia directa de estas fuentes de contaminación y utilizados por los autores como condición comparativa.

Los análisis estadísticos se realizaron en Python (versión v3.10; Python Software Foundation 2021) utilizando las librerías pandas y SciPy. Inicialmente, se calcularon estadísticos descriptivos (número de registros, media, mediana, desviación estándar y rango intercuartílico) para los valores de APTI según el tipo de vegetación (arbórea, arbustiva y herbácea). Debido a la presencia de valores extremos y distribuciones asimétricas, la mediana se utilizó como medida principal de tendencia central y se priorizó el uso de métodos no paramétricos. Las diferencias entre tipos de vegetación se evaluaron mediante la prueba de Kruskal-Wallis y se representaron mediante diagramas de caja y bigotes (boxplots).

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión de la presente revisión bibliográfica.

Table 1. Inclusion and exclusion criteria applied in the present literature review.

Criterio	Inclusión	Exclusión
Tipo de documento	Artículos científicos publicados en revistas indexadas y revisados por pares	Literatura gris, tesis, capítulos de libro, reportes técnicos o institucionales
Periodo de publicación	Estudios publicados entre enero de 2015 y diciembre de 2025	Publicaciones anteriores a 2015
Idioma	Artículos escritos en español o inglés	Publicaciones en otros idiomas
Enfoque temático	Estudios que aplicaran explícitamente el Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI) para evaluar la tolerancia o resistencia de especies vegetales frente a contaminantes atmosféricos en contextos urbanos o periurbanos, que tuvieran datos de APTI.	Artículos que no utilizaran el APTI o en los que el término no apareciera en el título, resumen o palabras clave
Fuente de información	Documentos disponibles en ScienceDirect, Web of Science, Google Scholar o PubMed	Publicaciones no indexadas en las bases de datos seleccionadas
Open Access	Artículos que fueran de acceso libre o que estuvieran en redes como ResearchGate disponibles para lectura libre	Artículos sin acceso libre o que se requiriera permiso en redes científicas como ResearchGate

Adicionalmente, para evaluar el efecto de la contaminación atmosférica sobre el APTI y sus componentes fisiológicos (TC, AA, pH y RWC), se seleccionaron únicamente los registros que reportaban valores tanto para zonas contaminadas como para sus correspondientes zonas control dentro del mismo estudio y para la misma especie vegetal, conformando pares de observaciones (en adelante, observaciones pareadas) entre ambas condiciones. Se obtuvieron 739 pares de observaciones para el APTI y 664 para las variables fisiológicas. La normalidad de las diferencias entre las observaciones pareadas se evaluó mediante la prueba de Shapiro–Wilk, evidenciándose desviaciones significativas de la normalidad ($p < 0.001$), por lo que las comparaciones se realizaron mediante la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras pareadas. Los resultados se describieron mediante medianas e IQR y se representaron gráficamente mediante boxplots.

Para el análisis taxonómico por familia botánica se cuantificó el número de registros por familia y su proporción relativa respecto al total de registros con información válida. Los resultados se mostraron con frecuencias absolutas y porcentajes incluyendo una gráfica que contenían las 15 familias con mayores valores y un anexo con las 85 familias identificadas en el estudio. Para finalizar, los valores del índice APTI fueron clasificados de acuerdo con la categorización propuesta por Singh et al., (1991) citada en (Molnár et al., 2020) clasificados en cuatro categorías de respuesta: sensible, intermedia, moderadamente tolerante y tolerante. Si bien existen otros enfoques para clasificar valores de APTI, esta categorización fue seleccionada por su relevancia histórica, al constituir una de las primeras y más ampliamente utilizadas clasificaciones del índice, lo que facilita la comparación de los resultados con estudios previos (**Tabla 2**). Este análisis permitió evaluar la distribución de las categorías de tolerancia dentro de cada grupo funcional vegetal. Para determinar la existencia de una asociación estadísticamente significativa entre ambas variables categóricas, se aplicó una prueba de Chi-cuadrado.

Tabla 2. Categorización de las especies vegetales según valores de APTI propuesto por Singh et al., 1991 citada en Molnár et al. (2020).

Table 2. Categorization of plant species based on APTI values according to Singh et al. (1991), as cited in Molnár et al. (2020).

APTI	Respuesta evaluada
>24	Tolerante
20-24	Moderadamente tolerante
15-19	Intermedio
<14	Sensible

Resultados

La producción científica publicada en revistas de acceso libre sobre el índice APTI mostró una marcada concentración geográfica con un número reducido de países donde se concentró la mayor proporción de estudios, destacándose principalmente India (n= 38) con un 59.38 %, mientras otras regiones presentaron una limitada representación como Pakistán (n=5) con un 7.81 %, Corea del Sur (n=4) y Nigeria (n=4) cada uno con un 6.25 %. Siguen Irán (n=2), República Democrática Socialista de Sri Lanka (n=2), Nepal (n=2) e Irak (n=2) cada uno con un 3.2 % y finalmente China (n=1), Polonia (n=1), Bangladesh (n=1), Túnez (n=1) y Filipinas (n=1) con un 1.56 % (**Fig. 2**). Estos resultados sugieren un uso intensivo del APTI en contextos asiáticos, asociados a problemáticas de contaminación atmosférica urbana.

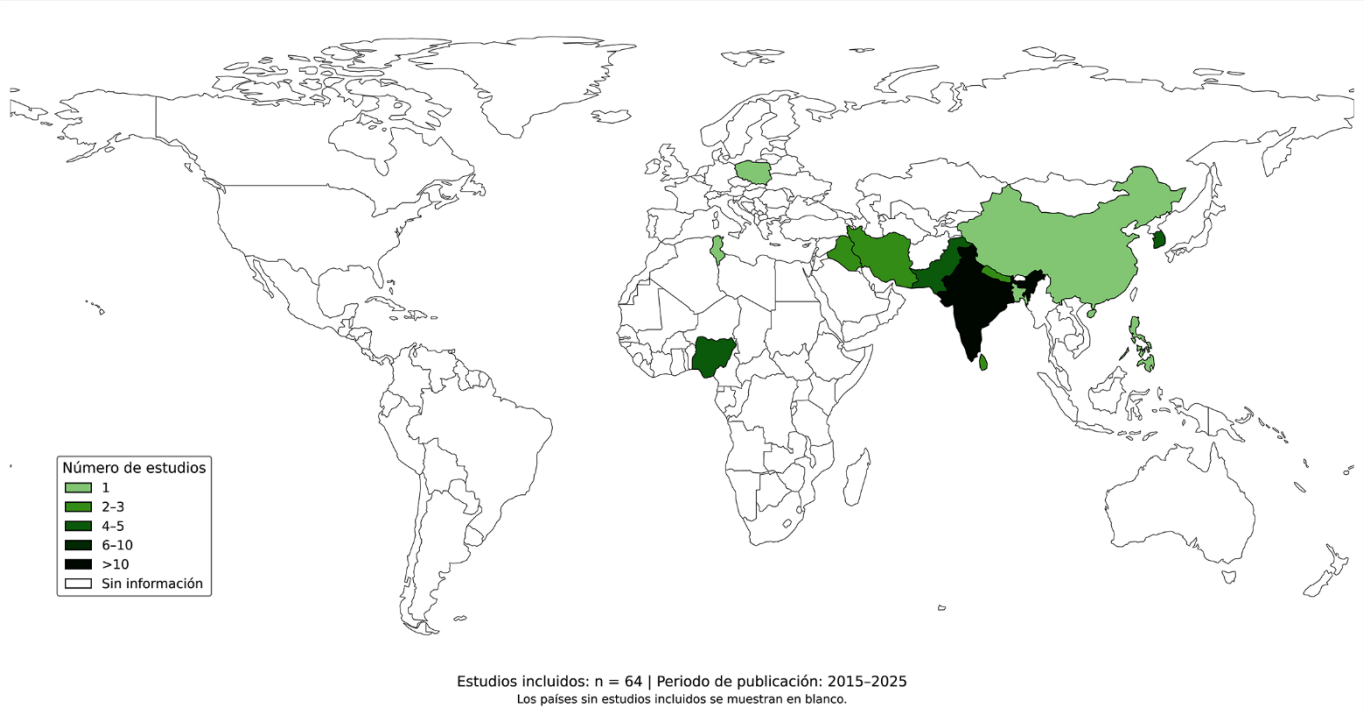


Figura 2. Distribución geográfica de los estudios incluidos en la revisión sistemática sobre el Índice de Tolerancia a la Contaminación Atmosférica (APTI) publicados entre 2015 y 2025.

Figure 2. Geographic distribution of the studies included in the systematic review on the Air Pollution Tolerance Index (APTI) published between 2015 and 2025.

Al analizar los valores de APTI en función del tipo de vegetación (arbustiva, arbórea o herbácea), donde se utilizaron 1564 datos elegidos con valores de APTI para zonas contaminadas, se observaron diferencias claras entre los grupos funcionales evaluados en donde los árboles concentraron el mayor número de registros (n=1024) como se observa en la **Figura 3**, presentando una mediana de APTI ligeramente superior y una clara dispersión de los valores.

La vegetación arbustiva (n=258) mostró una variabilidad aún más marcada, con una distribución amplia y la presencia de valores atípicos elevados (**Fig. 3**). Aunque la mediana fue comparable a lo observado en las especies arbóreas, los arbustos constituyen un grupo muy diverso en términos de tolerancia fisiológica, posiblemente asociado a diferencias estructurales, anatómicas y ecológicas.

Por su parte, la vegetación herbácea (n=282) presentó una distribución más compacta, con valores de APTI generalmente más bajos y una menor dispersión (**Fig. 3**). La mediana del índice fue inferior en los grupos leñosos, lo que sugiere una menor tolerancia relativa a la contaminación atmosférica.

Para analizar de manera más profunda la respuesta de la vegetación a la contaminación atmosférica, se seleccionaron únicamente los estudios que reportaban valores de APTI tanto en zonas contaminadas como en sus respectivos controles, con un total de 739 registros pareados. Los resultados mostraron diferencias significativas en los valores del APTI entre ambas condiciones (**Fig. 4**). La mediana del índice aumentó de 13.47 en las zonas control a 14.38 en las zonas contaminadas, lo que representa un incremento de 1.03 unidades del APTI.

La prueba de Wilcoxon reveló diferencias altamente significativas entre las zonas contaminada y control ($p<0.001$), acompañadas de un tamaño de efecto moderado ($r=0.43$). Aunque la magnitud absoluta del cambio fue relativamente moderada, el patrón fue consistente en una gran proporción de los registros analizados. En consecuencia, las especies evaluadas tienden a presentar valores más altos de APTI cuando crecen en ambientes expuestos a contaminación atmosférica.

Los valores de APTI presentaron una amplia dispersión en ambas condiciones (**Fig. 4**), evidenciando una alta variabilidad entre los registros analizados. A pesar de ello, la mayoría de los registros mostró una tendencia hacia valores más elevados de APTI en los ambientes contaminados.

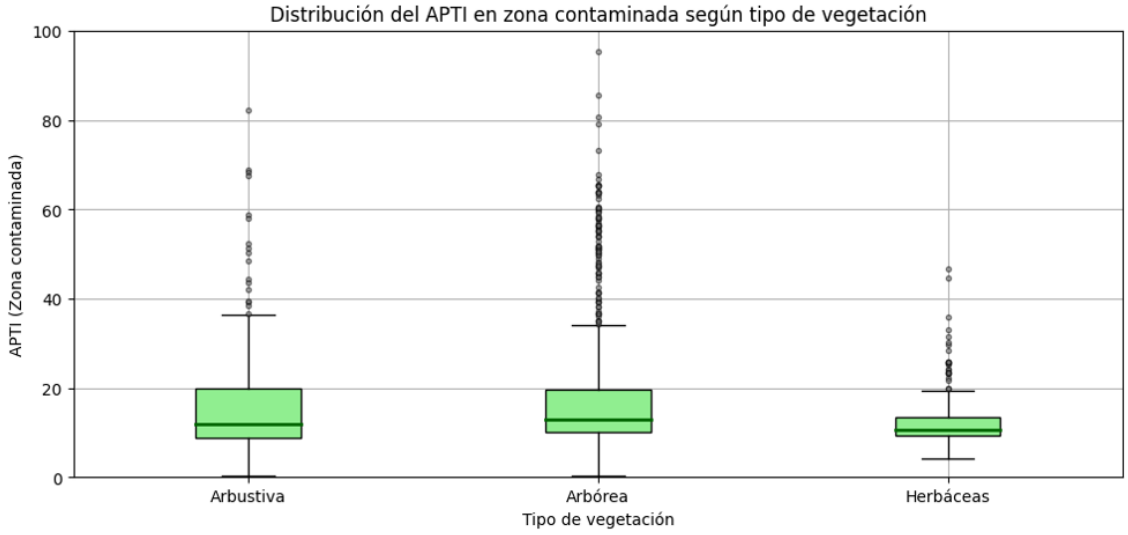


Figura 3. Distribución de los valores de APTI en zonas contaminadas según tipo de vegetación. Los diagramas de caja muestran la mediana y el rango intercuartílico. Los puntos representan valores individuales. Las diferencias entre grupos se evaluaron mediante Kruskal–Wallis ($H = 28.575$; $gl = 2$; $p = 6.24 \times 10^{-7}$) y el post-hoc de Dunn-Holm indicó diferencias significativas entre arbóreas y arbustivas, y entre arbóreas y herbáceas.

Figure 3. Distribution of APTI values in contaminated areas according to vegetation type. Boxplots show the median and interquartile range. Points represent individual values. Differences among groups were evaluated using the Kruskal–Wallis test ($H = 28.575$; $df = 2$; $p = 6.24 \times 10^{-7}$), and the Dunn–Holm post-hoc test indicated significant differences between trees and shrubs, and between trees and herbaceous plants.

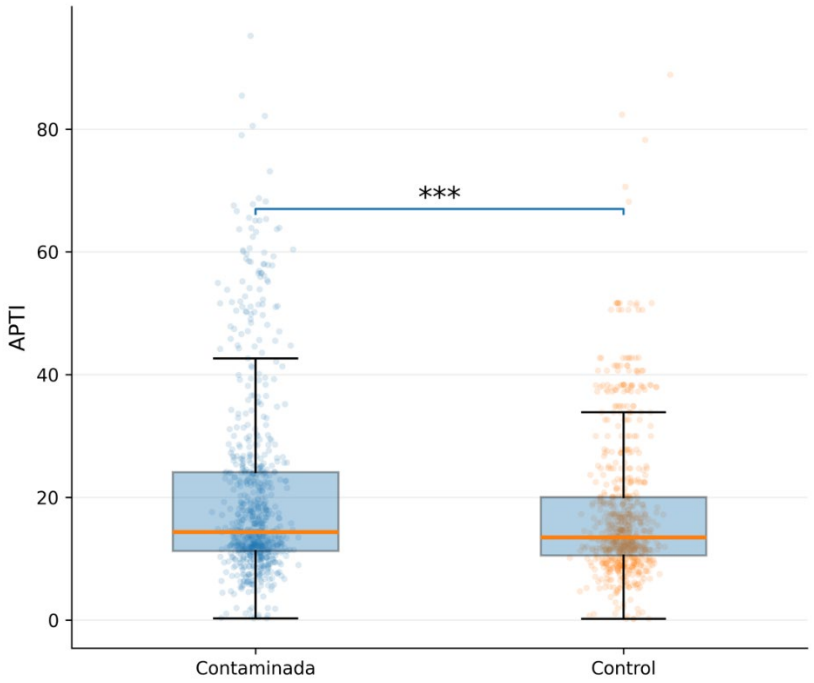


Figura 4. Distribución de los valores del Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI) en zonas contaminadas y zonas control. Los diagramas de caja muestran la mediana y el rango intercuartílico, mientras que los puntos corresponden a observaciones individuales ($n = 739$). (Wilcoxon pareado: $W = 68\ 154$, $p < 0.001$, $r = 0.43$). Los asteriscos (***) indican diferencias significativas ($p < 0.001$).

Figure 4. Distribution of Air Pollution Tolerance Index (APTI) values in polluted and control sites. Boxplots represent the median and interquartile range (IQR), while points correspond to individual observations ($n = 739$). Differences between conditions were evaluated using the paired Wilcoxon signed-rank test ($W = 68\ 154$, $p < 0.001$, $r = 0.43$). Asterisks (***) indicate statistically significant differences ($p < 0.001$).

El análisis de los componentes fisiológicos que integran el índice APTI evidenció diferencias significativas entre las zonas contaminadas y las zonas control para todas las variables evaluadas (Fig. 5). A partir de 664 registros pareados, se observaron cambios consistentes en el contenido de clorofilas totales (TC), ácido ascórbico (AA), pH foliar y contenido relativo de agua (RWC) entre ambas condiciones.

Las clorofilas totales (TC) presentaron una disminución significativa en las zonas contaminadas, pasando de una mediana de 2.37 en las zonas control a 2.04 en los sitios contaminados (Fig. 5). La distribución de los datos mostró una tendencia consistente hacia valores más bajos en los ambientes contaminados, aunque con una variabilidad considerable entre los registros analizados. En contraste, el ácido ascórbico (AA) presentó un incremento significativo, con una mediana de 5.87 en las zonas control y de 7.22 en las zonas contaminadas (Fig. 5). La distribución de los valores mostró una tendencia consistente hacia concentraciones más elevadas en los ambientes contaminados, aunque con una amplia dispersión entre los registros analizados.

El pH foliar también presentó diferencias significativas entre ambas condiciones. La mediana disminuyó ligeramente de 6.22 en las zonas control a 6.19 en las zonas contaminadas (Fig. 5). En comparación con las demás variables fisiológicas, este componente mostró una menor magnitud de cambio entre ambas condiciones. Por su parte, el contenido relativo de agua (RWC) aumentó de una mediana de 70.19 % en las zonas control a 72.97 % en las zonas contaminadas (Fig. 5). Aunque la variabilidad entre los registros fue elevada, la mayoría de las observaciones mostró una tendencia hacia valores superiores de RWC en los ambientes contaminados.

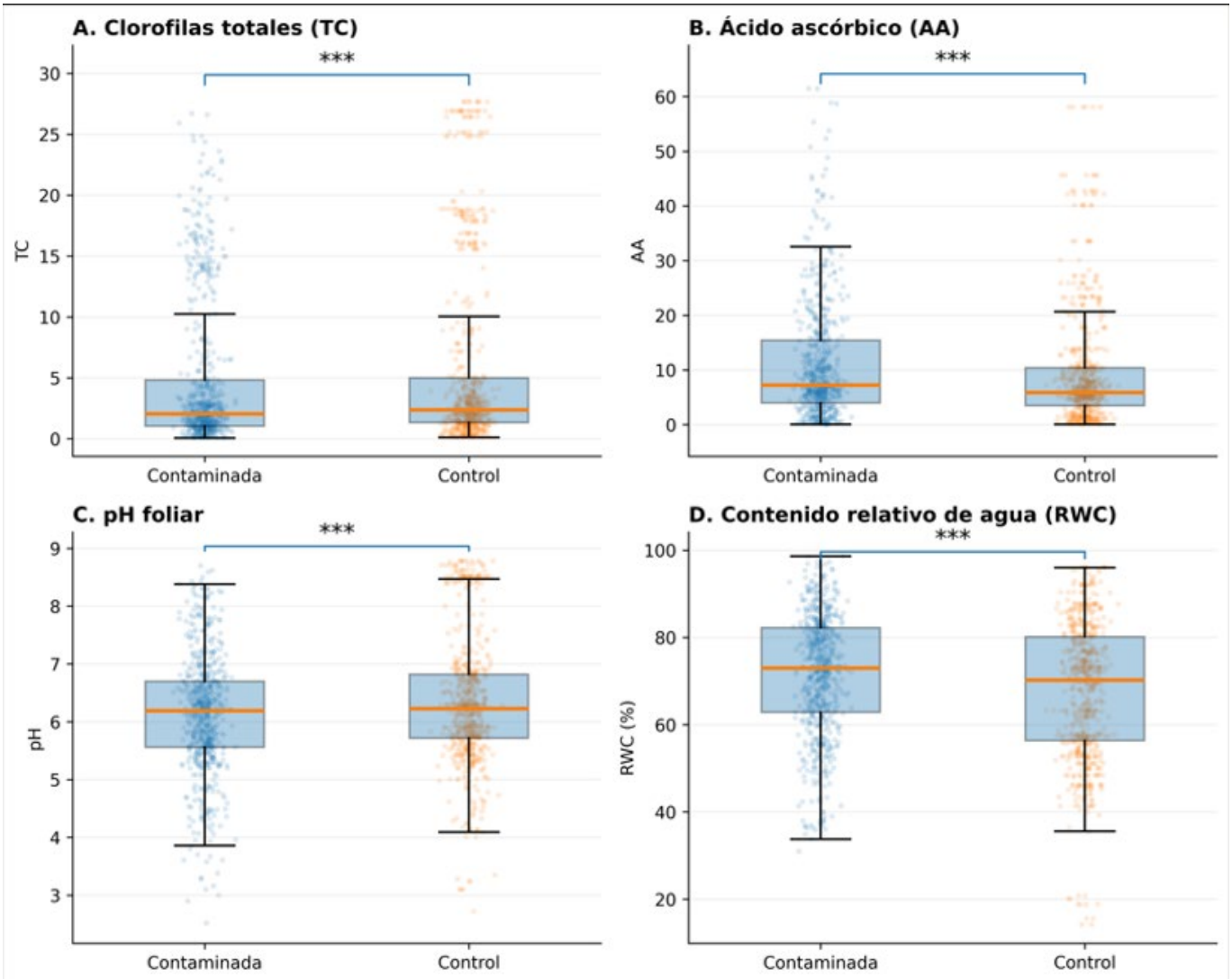


Figura 5. Comparación de los componentes fisiológicos que integran el Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI) entre zonas contaminadas y zonas control. Los diagramas de caja muestran la mediana y el rango intercuartílico (IQR), mientras que los puntos representan observaciones individuales (n = 664). Las diferencias entre condiciones se evaluaron mediante la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras pareadas. Los asteriscos (*) indican diferencias significativas ($p < 0.001$).

Figure 5. Comparison of the physiological components of the Air Pollution Tolerance Index (APTI) between polluted and control sites. Boxplots show the median and interquartile range (IQR), while points represent individual observations (n = 664). Differences between conditions were evaluated using the paired Wilcoxon signed-rank test. Asterisks (*) indicate statistically significant differences ($p < 0.001$).

Se realizó un registro del índice de APTI reportado en 85 familias botánicas, en donde se destaca a la familia Fabaceae (n=306) con un 16.84 %, Moraceae (n=186) con un 10.24 %, Apocynaceae (n= 172) con un 9.47 % y Meliaceae (n=120) con un 6.60 %, Poaceae (n=90) con un 4.95 % y Myrtaceae (n= 85) con un 4.68 % (**Fig. 6**).

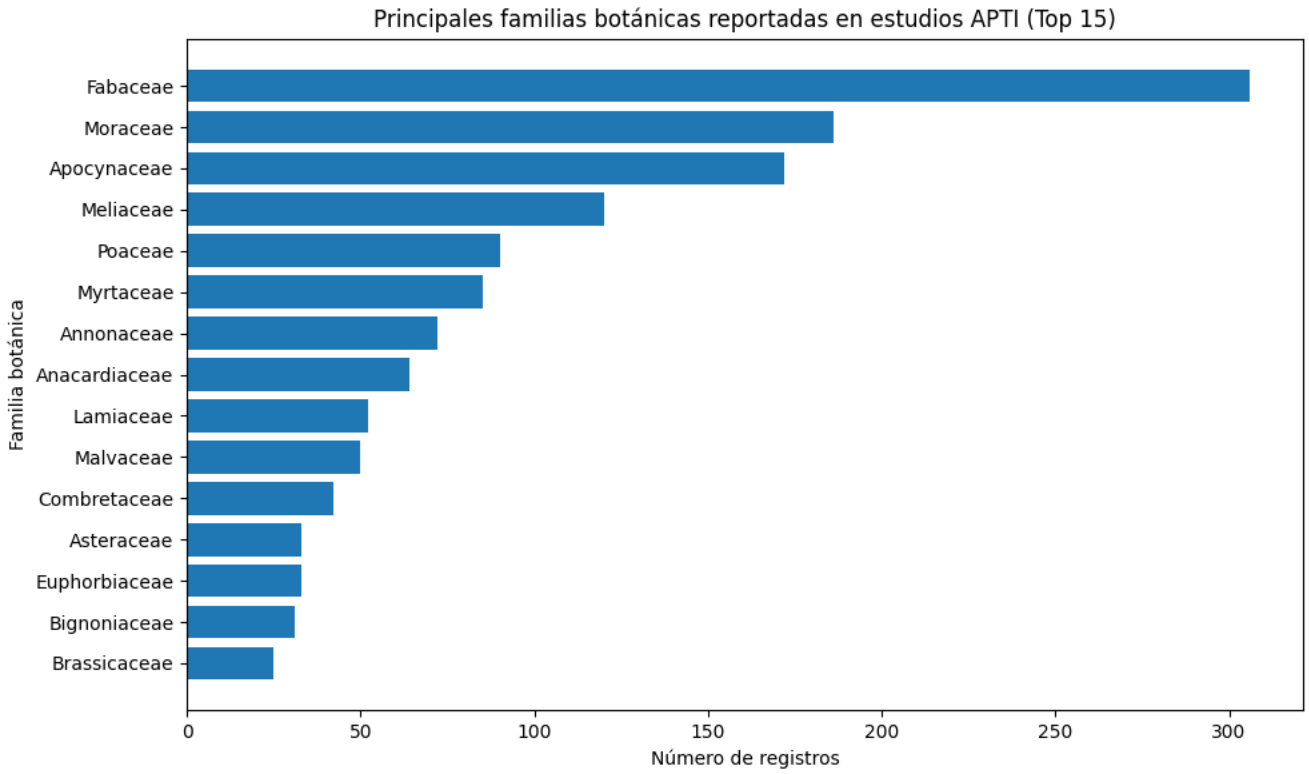


Figura 6. Principales familias reportadas en estudios de APTI.

Figure 6. Major plant families reported in APTI studies.

La clasificación de las especies se realizó siguiendo los criterios propuestos por Singh et al. (1991) citada en (Molnár et al., 2020), que consideran especies sensibles aquellas con valores de APTI inferiores a 14, intermedias entre 15 y 19, moderadamente tolerantes entre 20 y 24 y tolerantes cuando presentan valores superiores a 24 (**Tabla 2**). La matriz consolidada incluyó 388 especies.

La distribución de las categorías mostró un claro predominio de registros clasificados como sensibles (67 %), seguidos por las categorías tolerante (25.9 %), intermedia (12.5 %) y moderadamente tolerante (5.7 %) (**Tabla 3**). Estos resultados indican que la mayor parte de los valores de APTI reportados en la literatura se concentran en los rangos inferiores del índice, aunque también evidencian la existencia de un grupo importante de especies capaces de mantener elevados niveles de tolerancia frente a la contaminación atmosférica.

Entre las especies que presentaron con mayor frecuencia valores correspondientes a la categoría tolerante destacaron *Azadirachta indica* (Karmakar y Padhy, 2019), *Polyalthia longifolia* (Patel et al., 2022), *Mangifera indica* (Sahu et al., 2020), *Cassia fistula* (Patel et al., 2022) y *Nerium indicum* (Yadav et al., 2024), mientras que las especies con mayor número de registros clasificados como sensibles fueron *Tectona grandis* (Ashick Rajah et al., 2025), *Ficus religiosa* (Ter et al., 2020), *Alstonia scholaris* (Patel y Kumar, 2018), *Ficus benghalensis* (Tripathi y Nema, 2023) y *Triticum aestivum* (Malav et al., 2022). Estas especies representan ejemplos contrastantes de la amplia variabilidad observada en las respuestas fisiológicas frente a la contaminación atmosférica.

Un hallazgo particularmente relevante fue que 116 especies (29.9 % del total) aparecieron clasificadas en más de una categoría de tolerancia. Entre los casos más representativos se encontraron *Azadirachta indica* categorizada entre sensible (Tripathi y Nema, 2023), intermedio (Balasubramanian et al., 2018), moderadamente tolerante (Bharti et al., 2018) y tolerante (Karmakar y Padhy, 2019); *Polyalthia longifolia* clasificada como sensible (Tripathi y Nema, 2023), intermedia (Sahu et al., 2020), moderadamente tolerante (Patel et al., 2022) y tolerante (Ashick Rajah et al., 2025); *Ficus religiosa*, con registros que abarcaron desde sensible (Tripathi y Nema, 2023), intermedio (Sahu et al., 2020), moderadamente tolerante (Singh et al., 2024) y tolerante (Lohe et al., 2015); y *Acacia auriculiformis*, reportada como sensible (Anake et al., 2019), intermedio (Su et al., 2018), moderadamente tolerante y tolerante (Karmakar y Padhy, 2019).

La presencia de especies clasificadas en múltiples categorías sugiere que el APTI no constituye una característica fija e inherente de las especies vegetales, sino una respuesta fisiológica influenciada por factores ambientales, niveles de contaminación, condiciones climáticas locales, características edáficas y diferencias metodológicas entre estudios. Este resultado

constituye una de las evidencias más claras de la heterogeneidad existente en la literatura sobre APTI y refuerza la necesidad de avanzar hacia protocolos más estandarizados para la medición y aplicación de este índice en estudios de contaminación atmosférica y selección de especies urbanas.

Tabla 3. Clasificación de las 388 especies registradas en la revisión según los rangos de tolerancia del Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI). Para cada especie se presenta la categoría predominante de tolerancia, el número de registros disponibles y la escala visual correspondiente: + (sensible), ++ (intermedio), +++ (moderadamente tolerante) y ++++ (tolerante), de acuerdo con los criterios de Singh et al. (1991) citado en Molnár et al. (2020).

Table 3. Classification of the 388 plant species included in the review according to the Air Pollution Tolerance Index (APTI) tolerance categories. For each species, the predominant tolerance category, the number of available records, and the corresponding visual scale are presented: + (sensitive), ++ (intermediate), +++ (moderately tolerant), and ++++ (tolerant), following the criteria proposed by Singh et al. (1991) cited in Molnár et al. (2020).

Categoría APTI	Rango de APTI	Escala	Número de especies	Porcentaje (%)
Sensible	< 14	+	260	67.0
Intermedio	15–19	++	50	12.9
Moderadamente tolerante	20–24	+++	18	4.6
Tolerante	> 24	++++	60	15.5
Total	—	—	**388**	**100**

Discusión

Patrones globales en la aplicación del APTI y sesgos geográficos

Los resultados de esta revisión sugieren una marcada concentración geográfica en la aplicación del APTI, con predominio en estudios realizados en países asiáticos (Bui et al., 2023; He et al., 2024) o del medio oriente (Achakzai et al., 2017; Alobaidi, 2018), particularmente en la India (Acharya et al., 2017; Balasubramanian et al., 2018). Este patrón sugiere que el uso del índice ha estado fuertemente asociado a contextos urbanos con altos niveles de contaminación atmosférica (Patel et al., 2022) donde existe una necesidad urgente de mitigar la problemática ambiental entendiendo que las plantas son sumideros de material particulado y compuestos orgánicos volátiles (Treesubsuntorn et al., 2021; Xiao et al., 2025). Sin embargo, resulta indispensable comprender de manera más integral los efectos de la contaminación sobre la vegetación en distintos contextos, incluidos ambientes urbanos, industriales (Bharti et al., 2018), zonas cercanas a contaminantes como carbón o plantas termoeléctricas (Malav et al., 2022), vegetación cercana a granjas avícolas (Arshad et al., 2025) o bajo condiciones meteorológicas variables entre otros. En este sentido, el APTI constituye una herramienta de evaluación fisiológica de bajo costo que puede incorporarse en estudios de las plantas frente a diferentes niveles de contaminación atmosférica (Gholami et al., 2016). Sin embargo, el índice refleja la tolerancia fisiológica de las especies y no debe interpretarse, por sí solo, como una medida directa de su capacidad para remover contaminantes atmosféricos. En consecuencia, esta brecha de conocimiento refuerza la necesidad de fortalecer la investigación en esta área mediante estudios que integren al APTI con otros indicadores funcionales y de captura de contaminantes, resaltando la importancia del monitoreo de las plantas para evaluar tanto sus niveles de sensibilidad (Zouari et al., 2018) como su capacidad de tolerancia bajo diferentes condiciones ambientales.

La escasa representación de estudios provenientes de América Latina resulta especialmente relevante, considerando que muchas ciudades de esta región enfrentan problemáticas similares o incluso más complejas en términos de contaminación del aire, crecimiento urbano desordenado y vulnerabilidad al cambio climático. Los resultados refuerzan la necesidad de evaluar críticamente la aplicabilidad y validez del APTI bajo las condiciones ambientales propias de cada región. Sin embargo, la exclusiva inclusión de estudios de acceso abierto constituye una limitación metodológica que pudo generar sesgos de selección y afectar la representatividad geográfica y taxonómica de los resultados obtenidos.

El análisis comparativo del APTI según el tipo de vegetación reveló diferencias claras entre los grupos funcionales evaluados. Es claro que la contaminación atmosférica tiene un impacto sobre la síntesis bioquímica, y por ende, sobre el comportamiento de tolerancia de los árboles (Sahu et al., 2020). Las especies arbóreas concentraron la mayor proporción de registros y presentaron, en general, valores de APTI elevados, así como una mayor representación en las categorías de moderada tolerancia y tolerancia como *Eucalyptus globulus* y *Ficus religiosa* que son recomendadas para ser sembradas a lo largo de vías urbanas o en zonas industriales en Dehradun, India (Lohe et al., 2015; Bala et al., 2022) o *Azadirachta indica* y *Melia azedarach* que son recomendadas para siembra en focos urbanos severamente contaminados en Punjab, India (Yadav y Pandey, 2020). Este patrón sugiere que las plantas leñosas, particularmente los árboles, poseen una mayor capacidad fisiológica para amortiguar los efectos del estrés causado por la contaminación atmosférica. Sin embargo, no significa que las especies arbóreas no puedan ser bioindicadores, por ejemplo, *Polyalthia longifolia* es recomendada en este sentido para Delhi, India (Singh et al., 2024).

La mayor tolerancia relativa de contaminantes atmosféricos en especies arbóreas puede estar asociada a características estructurales y fisiológicas propias de estas especies, como una mayor superficie foliar, cutículas más desarrolladas, sistemas radicales profundos y una mayor capacidad de regulación hídrica y metabólica (Achakzai et al., 2017). Además, la longevidad de los árboles les permite desarrollar mecanismos de aclimatación frente a exposiciones prolongadas a contaminantes atmosféricos, lo que se refleja en valores más elevados en el índice APTI. En el caso de especies arbustivas, *Nerium oleander* y *Ligustrum lucidum* tuvieron muy buenos resultados como ecoacumuladores de la contaminación en vías urbanas en la ciudad de Luoyang, China (He et al., 2024)**.** Algunos arbustos del género *Ziziphus* fueron seleccionados como bioindicadores (Gholami et al., 2016). En determinados estudios se observó que los arbustos evaluados acumularon una mayor cantidad de material particulado de gran tamaño en sus hojas y fueron más eficientes que algunas especies arbóreas como *Euonymus japonicus* y *Euonymus alatus* (Bui et al., 2023).

En contraste, las especies herbáceas presentaron valores de APTI generalmente más bajos y una mayor proporción de registros clasificados como sensibles. Este comportamiento puede explicarse por sus características morfológicas y fisiológicas, ya que suelen presentar tejidos más delgados, menor protección cuticular y ciclos de vida más cortos, factores que pueden limitar su capacidad de respuesta frente al estrés causado por contaminantes atmosféricos. En concordancia con ello, Malav et al., (2022) señalaron que la absorción de contaminantes gaseosos como SO_2 y NO_2 pueden favorecer la formación de ácidos como H_2SO_4 y HNO_3 en los tejidos foliares, ocasionando una disminución de pH del extracto celular, uno de los componentes empleados para el cálculo del índice APTI. Además, estos contaminantes afectan otros parámetros fisiológicos, como el contenido de clorofila, el ácido ascórbico y el contenido relativo de agua, contribuyendo a la reducción del índice de tolerancia. Sin embargo, las plantas herbáceas desempeñan un papel clave en los ecosistemas urbanos, por lo que su alta sensibilidad es muy importante para convertirlas en valiosos bioindicadores tempranos del deterioro ambiental.

Todas las plantas son importantes para los ecosistemas urbanos, y debe contarse no solo con plantas tolerantes sino con plantas sensibles porque como lo resaltan Kaur y Nagpal (2017) las plantas con valores elevados de APTI pueden emplearse como bioacumuladoras mientras que aquellas con valores bajos de APTI pueden actuar como bioindicadores de la contaminación atmosférica (Lohe et al., 2015; Sahu et al., 2020). Es importante que no se establezcan monocultivos en las plantaciones urbanas debido a los riesgos climáticos y las responsabilidades ambientales asociadas permitiendo crear un nicho ecológico capaz de sostener una mayor diversidad a nivel de flora (Verma et al., 2022) y fauna.

Importancia del componente taxonómico y funcional en la tolerancia a la contaminación

La amplia diversidad taxonómica registrada en esta revisión, con 85 familias botánicas, pone de manifiesto la heterogeneidad de respuestas fisiológicas frente a la contaminación atmosférica (Aji et al., 2015) y la necesidad de planificar muy bien los arbolados urbanos. La predominancia de familias como Fabaceae, Moraceae y Apocynaceae puede reflejar tanto su amplia distribución en ambientes urbanos como una mayor atención científica hacia especies comúnmente utilizadas en arbolado urbano y paisajismo. Por ejemplo, *Calotropis procera* de la familia Apocynacea tuvo buenos resultados en tolerancia en Pakistán (Arshad et al., 2025).

La concentración de registros en un número reducido de familias sugiere un posible sesgo taxonómico en la aplicación del APTI, donde muchas familias menos representadas podrían estar subestimadas o insuficientemente evaluadas. Este sesgo limita la comprensión integral de la tolerancia vegetal a la contaminación y resalta la necesidad de ampliar estudios hacia grupos taxonómicos menos explorados, especialmente aquellos nativos de regiones tropicales y subtropicales. Está claro que hay que fortalecer la investigación profundizando no solo en árboles y arbustos, sino priorizar las herbáceas y las trepadoras, muy típicas de ambientes urbanos, ya que pueden actuar como importantes sumideros de contaminantes atmosféricos (Pandey et al., 2016).

Desde una perspectiva funcional, los resultados sugieren que la forma de crecimiento y la identidad taxonómica influyen de manera significativa en la respuesta fisiológica frente a los contaminantes atmosféricos, por ejemplo, las plantas leñosas perennes expresan una mejor tolerancia que los árboles de especies deciduas (Ahmad et al., 2025) o la capacidad de interceptación del polvo de las plantas depende de la geometría de la superficie foliar, la filotaxia y características externas de las hojas, como la presencia de tricomas, la cutícula, la longitud del peciolo, así como los rasgos estructurales (Nayak et al., 2018) de la planta. Por esta misma razón, se debe tener cautela con los resultados y las comparaciones entre especies, ya que, de las 388 especies evaluadas, se logra identificar que según el estudio puede tener diferentes categorizaciones, no necesariamente sea tolerante o sensible, sino que se debe evaluar en cada ciudad para establecer rasgos bioquímicos confiables. Este hallazgo respalda la importancia de incorporar criterios funcionales y taxonómicos en la selección de especies para programar la planificación y gestión de la vegetación urbana.

La clasificación de las especies según los criterios de Singh et al. (1991), citada en Molnár et al., (2020), mostró un predominio de especies sensibles, las cuales representaron aproximadamente el 67 % de las especies evaluadas. Este resultado indica que una gran parte de la vegetación estudiada experimenta alteraciones fisiológicas detectables frente a la contaminación atmosférica (Anand et al., 2022). Desde una perspectiva ecológica, este hallazgo pone de manifiesto que la contaminación continúa siendo un factor de presión importante sobre la vegetación urbana y que numerosas especies responden activamente a este estrés mediante modificaciones fisiológicas asociadas con la fotosíntesis, el balance hídrico y los sistemas antioxidantes (Karmakar et al., 2021; Banerjee et al., 2022).

La elevada proporción de especies sensibles resalta además el valor de la vegetación como herramienta de biomonitoreo ambiental (Roy et al., 2020). Las especies sensibles pueden actuar como indicadores biológicos de la calidad del aire (Ter et al., 2020), permitiendo detectar cambios ambientales antes de que sus efectos se manifiesten a escalas ecosistémicas más amplias (Su et al., 2018; Banerjee et al., 2022). En ese contexto, la identificación de especies con baja tolerancia constituye un insumo

importante para los programas de biomonitoreo y para el seguimiento de la calidad del aire en entornos urbanos. Asimismo, la respuesta de estas especies frente a la contaminación atmosférica pone de manifiesto la necesidad de fortalecer estrategias orientadas a la reducción de emisiones contaminantes y a la conservación de la salud de la vegetación urbana, con beneficios para el funcionamiento de los ecosistemas, la biodiversidad asociada y la salud humana.

De manera complementaria, las especies clasificadas como moderadamente tolerantes y tolerantes representan un recurso estratégico para la silvicultura urbana (Okunlola et al., 2016; Molnár et al., 2020). Especies como *Azadirachta indica*, *Polyalthia longifolia*, *Mangifera indica*, *Cassia fistula* y *Nerium indicum* fueron reportadas recurrentemente dentro de las categorías superiores de tolerancia, lo que indica una mayor tolerancia fisiológica frente al estrés asociado a la contaminación atmosférica. Los resultados de los estudios revisados sugieren que, dentro de sus respectivos regiones biogeográficas y considerando las condiciones ecológicas locales, estas especies pueden desempeñar un papel importante en la conformación de corredores verdes, cinturones vegetales y programas de revegetación orientados a mejorar la calidad ambiental con elevados niveles de contaminación (Karmakar y Padhy, 2019; Molnár et al., 2020). En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que las especies sensibles y las especies tolerantes cumplen funciones complementarias en la gestión de la vegetación urbana: las primeras aportan herramientas para el biomonitoreo ambiental, mientras que las segundas aportan criterios para la selección de especies en programas de arborización e infraestructura verde en ambientes sometidos a contaminación atmosférica. Estos resultados también ponen de manifiesto la necesidad de ampliar el conocimiento sobre la respuesta fisiológica de las especies vegetales en diferentes regiones biogeográficas. La generación de información regional permitirá construir perfiles de tolerancia más representativos, considerando las condiciones ambientales locales y las características propias de cada flora, fortaleciendo así la selección de especies para programas de arborización, restauración y biomonitoreo ambiental.

No obstante, los resultados sugieren que las estrategias de arborización urbana no deberían centrarse exclusivamente en especies altamente tolerantes. Una gestión adecuada de la infraestructura verde requiere integrar especies con diferentes niveles de respuesta fisiológica, de manera que la vegetación urbana contribuya simultáneamente al biomonitoreo ambiental, al mantenimiento de la biodiversidad y a la mitigación de los efectos de la contaminación atmosférica (Su et al., 2018). Sin embargo, el establecimiento de una infraestructura verde funcional debe entenderse como una estrategia complementaria y no sustitutiva de las políticas orientadas a la reducción de las emisiones contaminantes, las cuales continúan siendo la medida más efectiva para mejorar la calidad ambiental urbana. Desde esta perspectiva, las especies sensibles y tolerantes no deben considerarse categorías excluyentes, sino componentes complementarios de sistemas urbanos funcionalmente diversos, donde la gestión de la vegetación y el control de las fuentes de emisión actúan de manera conjunta para favorecer la salud de los ecosistemas urbanos, la biodiversidad y el bienestar humano.

Uno de los hallazgos más relevantes de esta revisión fue la identificación de 116 especies (29.9 % del total) clasificadas en más de una categoría de tolerancia. Lejos de representar una inconsistencia, este patrón constituye una evidencia de la plasticidad fisiológica que presentan muchas especies vegetales frente a la contaminación atmosférica. Los resultados sugieren que la tolerancia no es una característica fija e inherente de las especies, sino una respuesta dinámica influenciada por factores climáticos, edáficos, ambientales y por las condiciones particulares de exposición a contaminantes. En consecuencia, una misma especie puede exhibir comportamientos contrastantes cuando es evaluada en diferentes regiones, ecosistemas o escenarios de contaminación (Su et al., 2018; Karmakar et al., 2021).

Esta capacidad de ajuste fisiológico tiene implicaciones importantes para la planificación y la silvicultura urbana. Tradicionalmente, las recomendaciones de arborización se han apoyado en listados generales de especies clasificadas como tolerantes o sensibles. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que la respuesta observada en una ciudad no necesariamente puede extrapolarse a otras condiciones ambientales. Por ello, más que generar listados universales de especies recomendadas, resulta fundamental comprender el comportamiento local de las especies bajo las condiciones climáticas, edáficas y ambientales específicas de cada región (Banerjee et al., 2022).

La variabilidad observada puede interpretarse como una oportunidad para optimizar la toma de decisiones en programas de infraestructura verde urbana. El conocimiento de cómo responden las especies bajo diferentes condiciones ambientales permite seleccionar de manera más eficiente aquellas con mejor desempeño local (Okunlola et al., 2016), reducir costos asociados al establecimiento y mantenimiento de la vegetación y aumentar la probabilidad de éxito de los programas de arborización (Banerjee et al., 2022). En este contexto, el APTI no solo constituye una herramienta para clasificar especies, sino también un instrumento para comprender la capacidad adaptativa de la vegetación frente a escenarios ambientales cambiantes (Su et al., 2018).

Interpretación fisiológica del APTI y sus componentes

El APTI integra variables fisiológicas clave como el contenido de clorofila total, pH foliar, contenido relativo de agua (CRA) y ácido ascórbico (Pandey et al., 2016), que reflejan distintos mecanismos de respuesta al estrés ambiental. El análisis de 664 registros pareados permitió identificar un patrón fisiológico consistente en la respuesta de las plantas frente a la contaminación atmosférica. Las zonas contaminadas presentaron una disminución significativa de las clorofilas totales y del pH foliar, acompañada por incrementos significativos del contenido de ácido ascórbico y del contenido relativo de agua. Estos resultados sugieren que la exposición a contaminantes atmosféricos desencadena una respuesta fisiológica compleja en la que coexisten procesos de daño celular y mecanismos de compensación orientados a mantener la funcionalidad metabólica de los tejidos vegetales.

El ácido ascórbico desempeña funciones esenciales en las plantas relacionadas con la foto protección, la división celular, la formación de las paredes celulares y la defensa (Ahmad et al., 2025) frente al estrés oxidativo**.** En la presente revisión, el incremento observado en el contenido de ácido ascórbico en las zonas contaminadas sugiere una activación de mecanismos

antioxidantes destinados a contrarrestar el aumento de especies reactivas de oxígeno (ROS) generado por la contaminación atmosférica (Achakzai et al., 2017). El ácido ascórbico es un potente antioxidante que mantiene la división celular y la estabilidad de las membranas celulares en condiciones de estrés, mediante la eliminación de radicales libres citotóxicos y ROS generadas por la fotooxidación del SO_2 a SO_3 (Kaur y Nagpal, 2017). Este hallazgo adquiere especial relevancia al considerar que el ácido ascórbico fue el componente que mostró la asociación más fuerte con el índice APTI, lo que sugiere que la capacidad antioxidante constituye uno de los principales determinantes de la tolerancia vegetal frente a ambientes contaminados. Desde esta perspectiva, el ácido ascórbico no solo actúa como un componente más del índice, sino como un indicador fisiológico clave de la capacidad adaptativa de las especies. Usualmente se ha reportado que los contenidos de ácido ascórbico fueron más elevados en el sitio contaminado respecto a los sitios controles (Pandey et al., 2016) pero esto puede variar de acuerdo a las condiciones ambientales que estén expuestos dichas plantaciones. No obstante, esta respuesta no fue uniforme entre todas las especies ni bajo todas las condiciones ambientales. Algunos estudios documentaron disminuciones en su concentración, atribuibles al consumo de ácido ascórbico durante la neutralización de radicales libres cuando la velocidad de utilización supera su capacidad de síntesis o regeneración (Ahmad et al., 2025). En algunos estudios, este parámetro es el más importante al considerar el potencial de tolerancia de las plantas frente a la contaminación atmosférica en una ubicación determinada (Singh et al., 2024) mostrando altos contenidos en zonas de tráfico como lo demostró *Polyalthia longifolia* (Ashick Rajah et al., 2025). Además, el pH foliar puede influir indirectamente sobre el contenido de ácido ascórbico. Valores de pH relativamente altos favorecen el metabolismo de hexosas como la glucosa y la galactosa, compuestos que participan como precursores en la ruta biosintética del ácido ascórbico. De esta manera, un pH foliar elevado puede favorecer la síntesis y acumulación de este antioxidante, fortaleciendo la capacidad de las plantas para responder al estrés oxidativo inducido por la contaminación atmosférica (Mukhopadhyay et al., 2021).

La disminución observada en las clorofilas reportadas en los diferentes estudios constituye una de las evidencias más claras de estrés fisiológico inducido por la contaminación atmosférica. Diversos contaminantes pueden afectar la integridad de los cloroplastos y acelerar la degradación de pigmentos fotosintéticos provocando clorosis debido al incremento en la actividad de la enzima clorofilasa (Bharti et al., 2018) o como lo reportan otros autores, las altas concentraciones de contaminantes atmosféricos pueden provocar la degradación de la molécula de clorofila a feofitina, mediante el reemplazo de los iones de magnesio (Mg^{2+}) por dos protones ($2H^{+}$) (Kaur y Nagpal, 2017) alterando la eficiencia de los procesos de captura de energía. Como consecuencia, las plantas experimentan una reducción de su capacidad fotosintética, lo que representa uno de los primeros efectos fisiológicos detectables frente al estrés ambiental. Este resultado coincide con el predominio de especies clasificadas como sensibles y confirma que la contaminación atmosférica continúa ejerciendo efectos negativos sobre procesos fundamentales para el crecimiento y la productividad vegetal. En este sentido, el contenido de clorofila es ampliamente considerado un indicador de productividad vegetal (Ahmad et al., 2025) pero no es por sí solo un parámetro de tolerancia (Ghafari et al., 2021). Sin embargo, el estrés inducido por la deposición de partículas de polvo sobre la superficie foliar afecta negativamente la concentración de clorofilas totales y los demás parámetros bioquímicos (Yadav y Pandey, 2020), reflejando alteraciones en el funcionamiento fisiológico de las plantas expuestas a ambientes contaminados. La reducción del contenido de clorofila y carotenoides en las hojas en zonas contaminadas conduce además a senescencia foliar prematura, limitando el crecimiento de las plantas (Mukhopadhyay et al., 2021).

El pH foliar y el contenido relativo de agua (CRA) están estrechamente relacionados con la regulación estomática y el balance hídrico, que se ven muy afectados porque a nivel urbano por ejemplo, el polvo y el material particulado se adsorben en la superficie de las hojas o son absorbidas hacia el interior de la hoja a través de los poros estomáticos (Kaur y Nagpal, 2017). Por su parte, las variaciones observadas en el pH foliar analizada en la presente revisión reflejan modificaciones en el equilibrio metabólico de los tejidos vegetales. La disminución del pH podría estar asociada con cambios en la actividad enzimática (Bharti et al., 2018), acumulación de metabolitos derivados de respuestas antioxidantes y alteraciones en la regulación fisiológica inducidas por la exposición prolongada a contaminantes. Aunque este componente mostró una menor capacidad explicativa que el ácido ascórbico, su comportamiento consistente entre estudios confirma que forma parte de la respuesta integrada de las plantas frente a la contaminación atmosférica. Un valor de pH bajo indica una mayor sensibilidad frente a la contaminación atmosférica reduciendo la conversión de hexosas a ácido ascórbico, mientras que un valor de pH más elevado refleja una mayor tolerancia (Pandey et al., 2016; Malav et al., 2022) porque como algunos autores lo afirman, este aumento de pH favorece la actividad reductora del ácido ascórbico y, por consiguiente, puede incrementar la tolerancia de las plantas frente a la contaminación atmosférica (Lohe et al., 2015; Kaur y Nagpal, 2017). Así, la alcalinidad determina el nivel de tolerancia de las especies vegetales mediante mecanismos de desintoxicación desarrollados por las plantas bajo condiciones de contaminación (Mukhopadhyay et al., 2021).

El incremento del contenido relativo de agua (CRA) observado en las zonas contaminadas complementa la respuesta defensiva de las plantas frente al estrés atmosférico y, es que, en zonas contaminadas se incrementa la permeabilidad celular y se favorece la pérdida de nutrientes, lo que conduce a una senescencia prematura de las hojas (Achakzai et al., 2017). La capacidad para mantener niveles elevados de hidratación favorece la estabilidad de membranas celulares, reduce el impacto del estrés oxidativo y permite sostener procesos metabólicos esenciales incluso bajo condiciones ambientales adversas (Sahu et al., 2020). Este mecanismo puede ser particularmente importante en ambientes urbanos, donde la contaminación atmosférica suele interactuar con otros factores de estrés como altas temperaturas, compactación del suelo y limitaciones hídricas. La importancia del CRA en la tolerancia vegetal ha sido ampliamente documentada. Se ha reportado una correlación positiva significativa entre el APTI y el CRA en hojas expuestas a ambientes viales (He et al., 2024), sugiriendo que este parámetro constituye uno de los principales factores asociados con la tolerancia frente a la contaminación atmosférica (Lohe et al., 2015). Un elevado contenido de agua permite mantener la actividad fisiológica de los tejidos, favorece el transporte de metabolitos y reduce los efectos negativos derivados de la acumulación de contaminantes (Kaur y Nagpal, 2017). Además, como lo reportan algunos estudios, contaminantes agresivos como partículas metálicas, ácidos y vapores químicos dañan los estomas y los sistemas radicales,

reduciendo la absorción y retención de agua conduciendo a valores más bajos de CRA (Ashick Rajah et al., 2025). O como lo reportan otros autores la tasa de transpiración de algunos árboles suelen ser más altas en ambientes con elevada contaminación, lo que conduce a una reducción del contenido relativo de agua, y en consecuencia, a la desecación de los tejidos (Bandara y Dissanayake, 2021). El agua es esencial para el desarrollo de las actividades fisiológicas, por tanto, un alto contenido de agua en los tejidos vegetales contribuye a una mayor tolerancia frente a la contaminación atmosférica, especialmente cuando las tasas de transpiración son elevadas (Nayak et al., 2018).

La integración de estos parámetros permite al APTI capturar de forma sintética la respuesta fisiológica de las plantas ante condiciones ambientales adversas. Como se reporta, las especies arbóreas con altos valores de APTI se caracterizan generalmente por presentar un pH foliar menos ácido, un mayor contenido de clorofila y valores elevados de CRA (Nayak et al., 2018). También se presentan variación de APTI de acuerdo a las épocas de lluvia, lo que sugiere que dichos parámetros bioquímicos varían significativamente según la estación (Tripathi y Nema, 2023) que podría afectarse aún más por los efectos del cambio climático.

Sin embargo, la revisión también evidencia diferencias metodológicas en la medición y reporte de estos parámetros, lo que puede influir en la comparabilidad de los valores de APTI entre estudios. Esta heterogeneidad resalta la necesidad de avanzar hacia protocolos más estandarizados que permitan una ampliación más consistente del índice a una escala regional o global. El APTI evalúa la tolerancia fisiológica de las especies a la contaminación atmosférica, pero no necesariamente su idoneidad para programas de arborización urbana o cinturones verdes. Para ello es necesario incorporar atributos ecológicos, morfológicos, funcionales y socioeconómicos mediante índices complementarios como el API (Rajakaruna y Masakorala, 2019).

Conclusiones

Los resultados de esta revisión sugieren que la tolerancia vegetal frente a la contaminación atmosférica debe entenderse como una respuesta fisiológica dinámica y dependiente del contexto ambiental, más que como una característica fija de las especies. La variabilidad observada entre regiones y condiciones ambientales evidencia que factores climáticos, edáficos y locales modulan de manera significativa la capacidad de las plantas para responder al estrés por contaminación atmosférica.

La integración de los componentes fisiológicos que conforman el APTI demuestra que este índice no solo permite clasificar especies según su nivel de tolerancia, sino también comprender los mecanismos asociados a la resiliencia vegetal. En particular, los resultados indican que la capacidad antioxidante y el mantenimiento del balance hídrico desempeñan un papel central en la respuesta adaptativa de las plantas frente a la contaminación atmosférica, incluso cuando se presentan alteraciones en procesos fisiológicos fundamentales como la fotosíntesis.

Asimismo, la elevada representación de especies clasificadas como sensibles evidencia que una proporción importante de la vegetación evaluada en la literatura presenta respuestas fisiológicas detectables frente a la contaminación atmosférica. Esto resalta el valor del APTI como herramienta para el biomonitoreo ambiental y pone de manifiesto la necesidad de fortalecer la evaluación de especies en diferentes regiones biogeográficas, con el fin de mejorar la selección de especies para programas de arborización, conservación y seguimiento de la calidad del aire.

Finalmente, la evidencia recopilada pone de manifiesto la necesidad de avanzar desde enfoques basados en clasificaciones universales de especies tolerantes hacia estrategias fundamentadas en la evaluación del desempeño de las especies en contextos locales y en su capacidad de ajuste fisiológico frente a diferentes condiciones ambientales. Bajo escenarios de urbanización acelerada y cambio climático, esta aproximación puede contribuir a una gestión más eficiente de la infraestructura verde urbana y a una mejor comprensión de los procesos ecológicos que determinan la resiliencia de la vegetación frente a múltiples factores de estrés. Asimismo, los resultados evidencian la necesidad de ampliar la evaluación del APTI en regiones biogeográficas aún poco representadas, con el propósito de generar perfiles regionales de tolerancia que fortalezcan la selección de especies para programas de biomonitoreo, restauración ecológica e infraestructura verde.

Los resultados deben interpretarse considerando la concentración geográfica de estudios y la inclusión exclusiva de literatura de acceso abierto.

Contribución de los autores

Ingrith Angélica Zárate-Caballero: Recursos, conceptualización, gestión de datos, investigación, metodología, redacción del borrador original, revisión y edición del texto, análisis formal. **Mery-Helen Tíjaro-Orejuela**: Supervisión, revisión y edición del texto. **Julián Yessid Arias-Pineda**: Supervisión, revisión y edición del texto.

Disponibilidad de datos y código

La matriz de datos utilizada en esta revisión sistemática se encuentra disponible como material suplementario asociado al presente artículo. Los análisis estadísticos se realizaron en Python (versión 3.10; Python Software Foundation, 2021) utilizando las librerías pandas y SciPy. No se generó un paquete de código específico asociado a esta publicación.

Financiación, permisos requeridos, potenciales conflictos de interés y agradecimientos

La presente investigación fue financiada con recursos personales por parte de los autores. No se requirieron permisos específicos para la ejecución de esta investigación, dado que se basó en el análisis de información previamente publicada y no implicó trabajo de campo ni experimentación directa con organismos. Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad INCCA de Colombia por el apoyo académico brindado. Así como a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y su semillero de investigación *FloraMyces Research* del grupo de investigación en Biogeografía y Ecología Evolutiva Neotropical (BEEN) y el Grupo de Investigación en Ecología y Conservación de Plantas de Colombia (GIEPEC) por el acompañamiento científico y el entorno colaborativo.

Referencias

Achakzai, K., Khalid, S., Adrees, M., Bibi, A., Ali, S., Nawaz, R., & Rizwan, M. (2017). Air pollution tolerance index of plants around brick kilns in Rawalpindi, Pakistan. *Journal of Environmental Management*, *190*, 252-258. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.072

Acharya, S., Jena, R. C., Das, S. J., Pradhan, C., & Chand, P. K. (2017). Assessment of air pollution tolerance index of some selected roadside plants of Bhubaneswar city of Odisha State in India. *Journal of Environmental Biology*, *38*(6), 1397-1403. https://doi.org/10.22438/jeb/38/6/MS-183

Ahmad, A., Muhammad, S., Shafiq, F., & Khalid, S. (2025). Woody perennials as bio-monitors of air pollution around brick kilns in peri-urban ecosystem using pollution tolerance indices. *Environmental Research Communications*, *7*(10), 105010. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ae0b46

Aji, M. M., Adamu, A. M., & Borkoma, M. B. (2015). *Determination of Air Pollution Tolerance Index of Selected Trees in Selected Locations in Maiduguri*. A*pplied Research Journal* 1(7), 378-383.

Alizadeh, B., & Hitchmough, J. (2019). A review of urban landscape adaptation to the challenge of climate change. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, *11*(2), 178-194. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-10-2017-0179

Alobaidi, W. A.-R. S. (2018). Calculation of the Air Pollution Tolerance Index of *Eucalyptus* plant in Baghdad city. *International Journal of Advanced Biological Research*, *8*((2) 2018), 250.

Anake, W. U., Eimanehi, J. E., & Omonhinmin, C. A. (2019). Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of selected plant species. *Indonesian Journal of Chemistry*, *19*(1), 239-244. https://doi.org/10.22146/ijc.35270

Anand, P., Mina, U., Khare, M., Kumar, P., & Kota, S. H. (2022). Air pollution and plant health response-current status and future directions. *Atmospheric Pollution Research*, *13*(8), 101508. https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101508

Arshad, A., Khalid, S., & Noor, M. J. (2025). Pollution tolerance assessment of the plants near poultry farms using air pollution tolerance index and metal accumulation index. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *22*(7), 5471-5482. https://doi.org/10.1007/s13762-024-06196-1

Ashick Rajah, R., Parthiban, K. T., Prasanthrajan, M., Vijayabhama, M., Pragati Patil., Sekar, I., ... Yadav, V. K. (2025). Evaluation of air pollution tolerance index of selected tree species to combat air pollution in urban areas of Mettupalayam, Tamil Nadu, India. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, *37*(1), 2524085. https://doi.org/10.1080/26395940.2025.2524085

Bala, N., Pakade, Y. B., & Katnoria, J. K. (2022). Assessment of air pollution tolerance index and anticipated performance index of a few local plant species available at the roadside for mitigation of air pollution and green belt development. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *15*(12), 2269-2281. https://doi.org/10.1007/s11869-022-01251-7

Balasubramanian, A., Prasath, C. N. H., Gobalakrishnan, K., & Radhakrishnan, S. (2018). Air Pollution Tolerance Index (APTI) Assessment in Tree Species of Coimbatore Urban City, Tamil Nadu, India. *International Journal of Environment and Climate Change*, 27-38. https://doi.org/10.9734/ijecc/2018/v8i127106

Bandara, W. A. R. T. W., & Dissanayake, C. T. M. (2021). Most tolerant roadside tree species for urban settings in humid tropics based on Air Pollution Tolerance Index. *Urban Climate*, *37*, 100848. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100848

Banerjee, S., Banerjee, A., & Palit, D. (2022). Morphological and biochemical study of plant species- a quick tool for assessing the impact of air pollution. *Journal of Cleaner Production*, *339*, 130647. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130647

Bharti, S. K., Trivedi, A., & Kumar, N. (2018). Air pollution tolerance index of plants growing near an industrial site. *Urban Climate*, *24*, 820-829. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.007

Bui, H.-T., Jeong, N.-R., & Park, B.-J. (2023). Seasonal Variations of Particulate Matter Capture and the Air Pollution Tolerance Index of Five Roadside Plant Species. *Atmosphere*, *14*(1), 138. https://doi.org/10.3390/atmos14010138

Ghafari, S., Kaviani, B., Sedaghathoor, S., & Allahyari, M. S. (2021). Assessment of air pollution tolerance index (APTI) for some ornamental woody species in green space of humid temperate region (Rasht, Iran). *Environment, Development and Sustainability*, *23*(2), 1579-1600. https://doi.org/10.1007/s10668-020-00640-1

Gholami, A., Mojiri, A., & Amini, H. (2016). Investigation of the Air Pollution Tolerance Index (APTI) using some plant species in Ahvaz Region. *The Journal of Animal and Plant Sciences. 26*(2): 475-480. Available at https://thejaps.org.pk/AbstractView.aspx?mid=2016-JAPS-64

He, C., Zhang, Z., Wang, Q., Zhang, Y., Wei, C., Zhang, L., Li, Z., Yu, H., Chang, C., & Zhang, Y. (2024). Evaluation of air pollution tolerance index of urban roadside young leaf and the correlation with its capturing capacity for water-insoluble fine particulate matters. *Air Quality Atmosphere and Health*, *17*(11), 2675-2691. https://doi.org/10.1007/s11869-024-01603-5

Karmakar, D., Deb, K., & Padhy, P. K. (2021). Ecophysiological responses of tree species due to air pollution for biomonitoring of environmental health in urban area. *Urban Climate*, *35*, 100741. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100741

Karmakar, D., & Padhy, P. K. (2019). Air pollution tolerance, anticipated performance, and metal accumulation indices of plant species for greenbelt development in urban industrial area. *Chemosphere*, *237*, 124522. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124522

Kaur, M., & Nagpal, A. K. (2017). Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of plants and their application in development of green space along the urban areas. *Environmental Science and Pollution Research International*, *24*(23), 18881-18895. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9500-9

Lasinskas, M., Jariene, E., Vaitkeviciene, N., Blinstrubiene, A., Sawicka, B., Sadowska, A., & Hallmann, E. (2021). Studies of the Variability of Sugars, Vitamin C, and Chlorophylls in Differently Fermented Organic Leaves of Willowherb (Chamerion angustifolium (L.) Holub). *Applied Sciences*, *11*(21), 9891. https://doi.org/10.3390/app11219891

Lohe, R. N., Tyagi, B., Singh, V., Tyagi, P., Khanna, D. R., & Bhutiani, R. (2015). A comparative study for air pollution tolerance index of some terrestrial plant species. *Global Journal of Environmental Science and Management*, *1*(4), 315-324. https://doi.org/10.7508/gjesm.2015.04.006

Malav, L. C., Kumar, S., Islam, S., Chaudhary, P., & Khan, S. A. (2022). Assessing the environmental impact of air pollution on crops by monitoring air pollution tolerance index (APTI) and anticipated performance index (API). *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(33), 50427-50442. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19505-3

Molnár, V. É., Simon, E., Tóthmérész, B., Ninsawat, S., & Szabó, S. (2020). Air pollution induced vegetation stress – The Air Pollution Tolerance Index as a quick tool for city health evaluation. *Ecological Indicators*, *113*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106234

Mukhopadhyay, S., Dutta, R., & Dhara, A. (2021). Assessment of air pollution tolerance index of *Murraya paniculata* (L.) Jack in Kolkata metro city, West Bengal, India. *Urban Climate*, *39*, 100977. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100977

Nayak, A., Madan, S., & Matta, G. (2018). Evaluation of Air Pollution Tolerance Index (APTI) and Anticipated Performance Index (API) of Some Plant species in Haridwar city. *Evaluation of Air Pollution Tolerance Index (APTI) and Anticipated Performance Index (API) of Some Plant species in Haridwar city*, *9*(1), 1-7. https://doi.org/10.31786/09756272.18.9.1.101

Okunlola, A. I., Adepoju, A. O., & Agele, S. O. (2016). Air Pollution Tolerance Index (APTI) and carbon sequestration of selected trees and shrubs for urban development in Akure Ondo State, Southwest Nigeria. *Brazilian Journal of Biological Sciences*, *3*(6), e240-e240. https://doi.org/10.21472/bjbs.030615

Pandey, A. K., Krishna, V., & Kumar, M. (2022). Air Pollution Tolerance Index (APTI) and Expected performance index (EPI) of Selected Plants at RGSC, (BHU), Mirzapur, India. *Pollution*, *8*(2), 479-487. https://doi.org/10.22059/POLL.2021.330458.1180

Pandey, A. K., Pandey, M., & Tripathi, B. D. (2016). Assessment of Air Pollution Tolerance Index of some plants to develop vertical gardens near street canyons of a polluted tropical city. *Ecotoxicology and Environmental Safety, Green Technologies for Environmental Pollution Control and Prevention (Part 2)*, *134*, 358-364. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.08.028

Patel, D., & Kumar, J. I. N. (2018). An Evaluation of Air Pollution Tolerance Index and Anticipated Performance Index of Some Tree Species Considered for Green Belt Development: A Case Study of Nandesari Industrial Area, Vadodara, Gujarat, India. *Open Journal of Air Pollution*, *7*(1), 1-13. https://doi.org/10.4236/ojap.2018.71001

Patel, K., Chaurasia, M., & Rao, K. S. (2022). Urban dust pollution tolerance indices of selected plant species for development of urban greenery in Delhi. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(1), 16. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10608-5

Pinho-Gomes, A.-C., Roaf, E., Fuller, G., Fowler, D., Lewis, A., ApSimon, H., Noakes, C., Johnstone, P., & Holgate, S. (2023). Air pollution and climate change. *The Lancet Planetary Health*, *7*(9), e727-e728. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00189-4

Python Software Foundation (2021). *Python Language Reference, version 3.10*. Disponible en: https://www.python.org/

Rajakaruna, R. K. M. J. M., & Masakorala, K. (2019). Air Pollution Tolerance Index (APTI) and Anticipated Performance Index (API) of plants found in Matara city area, Sri Lanka: An approach for recommending plants for landscaping city areas. *Journal of the University of Ruhuna*, *7*(2). https://doi.org/10.4038/jur.v7i2.7950

Roy, A., Bhattacharya, T., & Kumari, M. (2020). Air pollution tolerance, metal accumulation and dust capturing capacity of common tropical trees in commercial and industrial sites. *Science of The Total Environment*, *722*, 137622. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137622

Russo, A., Esperon-Rodriguez, M., St-Denis, A., & Tjoelker, M. G. (2025). Native vs. Non-Native Plants: Public Preferences, Ecosystem Services, and Conservation Strategies for Climate-Resilient Urban Green Spaces. *Land*, *14*(5). https://doi.org/10.3390/land14050954

Sahu, C., Basti, S., & Sahu, S. K. (2020). Air pollution tolerance index (APTI) and expected performance index (EPI) of trees in sambalpur town of India. *SN Applied Sciences*, *2*(8), 1327. https://doi.org/10.1007/s42452-020-3120-6

Singh, L., Sindhu, S. S., Singh, M. C., Jaiswal, S., Ankit, Kumar, S., Sharma, D. K., … Anand. (2024). Evaluation of tree species using Air Pollution Tolerance Index for urban landscaping in Delhi. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, *94*(1), 86-91. https://doi.org/10.56093/ijas.v94i1.139605

Šola, I., Poljuha, D., Pavičić, I., Tušek, A. J., & Šamec, D. (2025). Climate Change and Plant Foods: The Influence of Environmental Stressors on Plant Metabolites and Future Food Sources. *Foods*, *14*(3). https://doi.org/10.3390/foods14030416

Su, G. L. S., Solomon, N. F. R., & Ragragio, E. M. (2018). Air Pollution Tolerance Index of Selected Trees in Major Roadsides of Metro Manila, Philippines. *Nature Environment & Pollution Technology*, *17*(3), 1005.

Ter, S., Chettri, M. K., & Shakya, K. (2020). Air Pollution Tolerance Index of Some Tree Species of Pashupati and Budhanilkantha Area, Kathmandu. *Amrit Research Journal*, *1*(1), 20-28. (Nepal). https://doi.org/10.3126/arj.v1i1.32449

Treesubsuntorn, C., Setiawan, G. D., Permana, B. H., Citra, Y., Krobthong, S., Yingchutrakul, Y., Siswanto, D., & Thiravetyan, P. (2021). Particulate matter and volatile organic compound phytoremediation by perennial plants: Affecting factors and plant stress response. *The Science of the Total Environment*, *794*, 148779. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148779

Tripathi, D. P., & Nema, A. K. (2023). Seasonal variation of biochemical parameters and air pollution tolerance index (APTI) of selected plant species in Delhi city, and detailed meta-analysis from Indian metropolitan cities. *Atmospheric Environment*, *309*, 119862. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119862

Verma, J., Singh, P., & Sharma, R. (2022). Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of selected roadside tree species in Ludhiana, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(1), 240. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10784-4

Xiao, K., Wang, Y., Wang, R., Hu, Z., Peng, S., Miao, Z., & Ge, Z. (2025). Physiological and Biochemical Adaptation of Common Garden Plants to Inorganic Nitrogen-Laden Fine Particulate Matter Stress. *Horticulturae*, *11*(3), 337. https://doi.org/10.3390/horticulturae11030337

Yadav, A., Dixit, A., & Singh, D. (2024). Estimation of air pollution tolerance index of plants in selected locations in Kanpur City, India. *Materials Today: Proceedings, International Conference on Advances in Smart Materials, Chemical & Biochemical Engineering*, *102*, 148-151. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.222

Yadav, R., & Pandey, P. (2020). Assessment of Air Pollution Tolerance Index (APTI) and Anticipated Performance Index (API) of Roadside Plants for the Development of Greenbelt in Urban Area of Bathinda City, Punjab, India. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *105*(6), 906-914. https://doi.org/10.1007/s00128-020-03027-0

Zhu, S., Yu, H., Zhang, Y., Zhang, Y., & Kinnon, M. M. (2022). Editorial: Air pollution and climate change: Interactions and co-mitigation. *Frontiers in Environmental Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1105656

Zouari, N., Elloumi, N., Mezghani, I., Labrousse, P., Ben Rouina, B., Ben Abdallah, F., & Ahmed, C. B. (2018). A Comparative Study of Air Pollution Tolerance Index (APTI) of Some Fruit Plant Species Growing in the Industrial Area of Sfax, Tunisia. *Pollution*. https://doi.org/10.22059/poll.2017.242396.324