

Revista Cubana de Ciencias Forestales

Volumen 14, 2026, enero-diciembre



Estudio preliminar de los cambios anatómicos foliares en *Pinus tropicalis* y *Pinus caribaea* subsp. *caribaea* de zonas colindantes de la mina Castellanos, Minas de Matahambre, Pinar del Río, Cuba

*Preliminary study of foliar anatomical changes in **Pinus tropicalis** and **Pinus caribaea** subsp. *caribaea* from areas adjacent to the Castellanos mine, Minas de Matahambre, Pinar del Río, Cuba*

*Estudo preliminar das alterações anatômicas foliares em **Pinus tropicalis** e **Pinus caribaea** subsp. *caribaea* de áreas adjacentes à mina Castellanos, Minas de Matahambre, Pinar del Río, Cuba*

Ana Lucia Corrales-García^{1*}  , Gretel Geada-López¹ 

¹Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca". Pinar del Río, Cuba.

*Autor correspondiente: ana.corralesg@upr.edu.cu

Recibido: 13/02/2026.

Aprobado: 26/02/2026.



RESUMEN

La hoja constituye el órgano más sensible para detectar condiciones de estrés abiótico, incluyendo la contaminación por metales pesados derivada de actividades minero-metalúrgicas. En las zonas colindantes a la mina Castellanos, municipio Minas de Matahambre, provincia Pinar del Río, Cuba, se desarrollan pinares naturales de *Pinus tropicalis* y *Pinus caribaea* subsp. *caribaea* en suelos afectados por la actividad minera. Con el objetivo de caracterizar los cambios anatómicos foliares en ambos taxones, se colectaron acículas de 12 individuos por especie (cinco réplicas por individuo) y se realizaron cortes transversales midiendo 13 variables anatómicas. Se observó un aumento del grosor de la cutícula en ambos taxones y una disminución generalizada del diámetro de los canales resiníferos. En *P. caribaea* se constató, además, disminución del grosor del parénquima clorofílico, mientras que en *P. tropicalis* se redujo el número de estomas, el grosor de los parénquimas clorofílico y de transfusión, y las dimensiones del haz vascular. En ambas especies se detectaron concreciones intracelulares en tejidos vasculares, parénquima de transfusión y endodermis, sugestivas de quelatos metálicos. Adicionalmente, en *P. tropicalis* se observaron modificaciones epidérmicas en forma de pelos. Los cambios anatómicos presentes pueden ser respuestas adaptativas al estrés abiótico crónico. Este estudio constituye la primera evidencia anatómica de la respuesta de los pinos cubanos a la contaminación minera y sienta bases para futuras investigaciones fisiológicas y programas de restauración ecológica en la región.

Palabras clave: anatomía foliar, coníferas, estrés abiótico, metales pesados, minería.

ABSTRACT

The leaf constitutes the most sensitive organ for detecting abiotic stress conditions, including heavy metal pollution derived from mining-metallurgical activities. In areas adjacent to the Castellanos mine, Minas de Matahambre municipality, Pinar del Río province, Cuba, natural pine forests of *Pinus tropicalis* and *Pinus caribaea* subsp. *caribaea* grow on soils affected by mining activity. With the aim of characterizing foliar anatomical changes in both taxa, needles were collected from 12 individuals per species (five replicates per individual) and transverse sections were made, measuring 13 anatomical variables. An increase in cuticle thickness was observed in both taxa, along



with a generalized decrease in resin canal diameter. In *P. caribaea*, a decrease in chlorophyllous parenchyma thickness was also noted, while in *P. tropicalis* stomatal number, chlorophyllous and transfusion parenchyma thicknesses, and vascular bundle dimensions were reduced. In both species, intracellular concretions were detected in vascular tissues, transfusion parenchyma, and endodermis, suggestive of metal chelates. Additionally, in *P. tropicalis* epidermal modifications in the form of hairs were observed. The anatomical changes present may be adaptive responses to chronic abiotic stress. This study constitutes the first anatomical evidence of the response of Cuban pines to mining contamination and lays the groundwork for future physiological research and ecological restoration programs in the region.

Keywords: foliar anatomy, conifers, abiotic stress, heavy metals, mining.

RESUMO

A folha é o órgão mais sensível para detectar condições de estresse abiótico, incluindo a contaminação por metais pesados provenientes de atividades de mineração e metalurgia. Nas áreas ao redor da mina Castellanos, no município de Minas de Matahambre, província de Pinar del Río, Cuba, florestas naturais de pinheiros das espécies *Pinus tropicalis* e *Pinus caribaea* subsp. *caribaea* desenvolvem-se em solos afetados pela atividade de mineração. Para caracterizar as alterações anatômicas nas folhas de ambas as espécies, agulhas foram coletadas de 12 indivíduos por espécie (cinco repetições por indivíduo) e seções transversais foram realizadas, medindo-se 13 variáveis anatômicas. Observou-se um aumento na espessura da cutícula em ambas as espécies, juntamente com uma diminuição geral no diâmetro dos canais resiníferos. Em *P. caribaea*, observou-se também uma diminuição na espessura do clorênquima, enquanto em *P. tropicalis* houve redução no número de estômatos, na espessura do clorênquima e do parênquima transfusional, bem como nas dimensões do feixe vascular. Concreções intracelulares sugestivas de quelatos metálicos foram detectadas nos tecidos vasculares, no parênquima transfusional e na endoderme de ambas as espécies. Adicionalmente, modificações epidérmicas na forma de pelos foram observadas em *P. tropicalis*. As alterações anatômicas presentes podem ser respostas adaptativas ao estresse abiótico crônico. Este estudo constitui a primeira evidência anatômica da



resposta de pinheiros cubanos à poluição por mineração e estabelece as bases para futuras pesquisas fisiológicas e programas de restauração ecológica na região.

Palavras-chave: anatomia foliar, coníferas, estresse abiótico, metais pesados, mineração, Pinar del Río

INTRODUCCIÓN

La hoja en las coníferas constituye el órgano ideal para estudiar la respuesta al estrés abiótico por la doble función que realiza (Huang *et al.*, 2016), por lo que ha de modificarse en aras de garantizar la aclimatación, la adaptación y/o la sobrevivencia de la planta (Kalugina *et al.*, 2024). Este órgano es el más sensible para mostrar las condiciones del suelo, tanto en nutrientes y metales pesados como de la disponibilidad de agua (Çomaklı y Bingöl, 2021; Pérez del Valle *et al.* 2020).

La hoja enfrenta una tensión fisiológica fundamental: maximizar la fotosíntesis, lo que requiere una amplia superficie de intercambio y la apertura de los estomas, y al mismo tiempo minimizar la pérdida de agua, para lo cual requiere una barrera eficiente contra la transpiración (Evert, 2006). Su arquitectura es el resultado de la expresión de una batería genética que, sin embargo, posee un grado significativo de plasticidad fenotípica en respuesta a señales ambientales durante la morfogénesis (Zhang *et al.*, 2017; Tsukaya, 2013). Por ello, cualquier modificación significativa y consistente en su patrón estructural, puede interpretarse como una respuesta adaptativa a presiones ambientales específicas y no como variación casual.

Frente a un estrés ambiental crónico, como el generado por la contaminación, las plantas no solo responden con cambios visibles en su morfología externa, sino con profundas reestructuraciones a nivel tisular y celular (Wronska-Pilarek *et al.* 2023; Gratani, 2014; Evert, 2006). Por lo que el estudio de los cambios en la anatomía foliar representa una alternativa para evaluar el impacto de contaminantes, ya que proporciona un conjunto de marcadores estructurales altamente sensibles que permiten inferir el tipo e intensidad del estrés abiótico (Çomaklı y Bingöl 2021; Leghari y Zaidi, 2013). Esta aproximación es especialmente valiosa en ecosistemas forestales sujetos a estrés combinado, como el derivado de la carga de metales pesados y la acidez del suelo en áreas mineras.



Si bien en el género *Pinus* se han documentado modificaciones en la anatomía foliar como respuesta a la contaminación ambiental, en particular la atmosférica, la mayoría de estas se concentran en especies boreales y templadas (Delian y Savulescu, 2022; Aricak *et al.*, 2019; Ncube y Phiri, 2015; Kord y Kord, 2011) y son escasos los estudios que involucren la contaminación del suelo.

Un ejemplo de contaminación ocasionada por la actividad minero-metalúrgica se encuentra en las zonas colindantes a la Mina Castellanos en el municipio Minas de Matahambre, provincia Pinar del Río, Cuba (Bruguera-Amarán *et al.*, 2022), la que pudiera afectar a los individuos de *Pinus tropicalis* y *P. caribaea* (Geadá-López y García-Beltrán, 2024; Geadá-López *et al.*, 2022; 2021), entre otras especies que crecen naturalmente, a no ser que desarrollen cambios fisiológicos y/o anatómicos. Por ello, este estudio tiene como objetivo caracterizar los cambios anatómicos foliares en *Pinus tropicalis* y *Pinus caribaea* de zonas colindantes de la Mina Castellanos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras de acículas se colectaron en pinares naturales, donde se desarrollan en simpatria *Pinus caribaea* subsp. *caribaea* y *P. tropicalis*, de zonas de concesión minera de la empresa mixta EMINCAR S.A. colindantes con la Mina Castellanos, Pinar del Río, afectadas por la actividad minero-metalúrgica, aunque no hay actividad minera directa. Se seleccionaron acículas de 12 individuos al azar entre ambos taxones y de cada individuo se tomaron cinco réplicas correspondientes a diferentes ramas.

Para la caracterización anatómica se realizaron cortes transversales en cinco acículas seleccionadas al azar de cada individuo. Para comprobar la continuidad de los canales de resina y de las hileras de estomas, se realizaron cortes transversales cada 1 cm a lo largo de la acícula; como estos fueron continuos, se escogió la parte media de las acículas para las mediciones.



Las observaciones se realizaron con un microscopio óptico NLCD-307B. Se midieron las siguientes variables anatómicas con un aumento de 400×: grosor de la cutícula, grosor de la epidermis, grosor de la hipodermis y número de capas de células de la hipodermis; con aumento de 100× se midieron grosor del tejido parénquima de transfusión, grosor del parénquima clorofílico, diámetro del canal resinífero izquierdo, diámetro del canal resinífero derecho, altura del haz vascular y el ancho del haz vascular, número de estomas, número de canales y su tipología. Todas las variables se definieron tal como Pérez-del Valle *et al.* (2020) y se adicionó el grosor de la endodermis.

RESULTADOS

Pinus caribaea subsp. *caribaea*

La estructura anatómica equifacial, en forma de abanico, de los cortes de las acículas muestra una epidermis uniestratificada. Los estomas se disponen de igual manera en las superficies abaxial y adaxial; el número promedio de hileras de estomas por acícula fue 18; estos se encuentran hundidos y las cámaras estomáticas llegan hasta la hipodermis. La hipodermis posee dos a tres capas de células, de tipo multiforme. Seguido se presenta el parénquima clorofílico, que tiene como promedio dos capas de células con los bordes replegados y a continuación varias capas de células del tejido parénquima de transfusión. Todos los individuos revisados del taxón presentaron canales de tipo endonal sumergidos en el parénquima clorofílico y en contacto con la endodermis.

En las muestras evaluadas de *P. caribaea* aparecen imágenes de concreciones sugestivas de quelatos en los tejidos vasculares, parénquima de transfusión y endodermis. Tienen diferentes formas de color gris oscuro a negro y anaranjado rojizo (Figura 1).



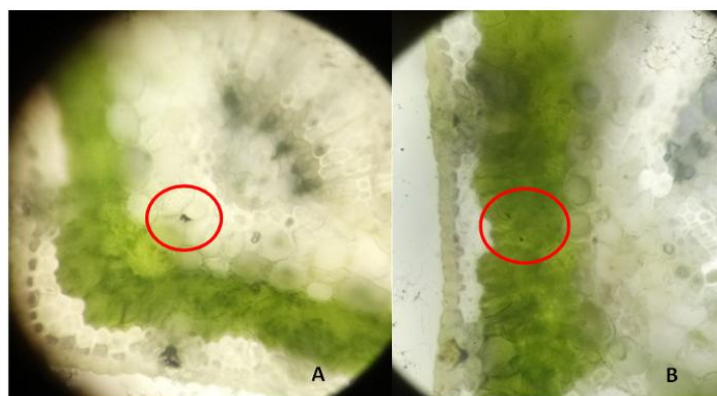


Figura 1. Cortes con imágenes sugestivas de quelatos de color negro en acícula de *Pinus caribaea*. A. en tejido parénquima de transfusión y B. en tejido parénquima clorofílico con un aumento de 100X

Pinus tropicalis

La estructura anatómica es equifacial en semicírculo con una epidermis uniestratificada. Los estomas se disponen de igual manera a lo largo de la sección transversal; el número promedio de hileras de estomas por acícula es 12. Estos se caracterizan por estar muy hundidos en la hipodermis y su cámara subestomática llega hasta el parénquima clorofílico. A continuación de la epidermis, se encuentra la hipodermis con una a dos capas de células uniformes; esta zona tiene gran cantidad de esclerénquima. El parénquima clorofílico se encuentra muy bien definido; en él se aprecian grandes canales resiníferos que lo subdividen, formando paquetes de tejido fundamental. Hacia el interior se encuentra el tejido de transfusión y en el centro dos haces vasculares. Los dos canales resiníferos dispuestos en los extremos de la superficie adaxial son de tipo septal, pues están en contacto con la endodermis y con la hipodermis, mientras que el resto son de tipo marginal.

En los cortes se encontraron imágenes de concreciones sugestivas de quelatos que aparecieron en los tejidos vasculares, parénquima de transfusión y endodermis. En gran parte de los cortes de *P. tropicalis*, además, se observó una modificación en el tejido epidérmico con forma de pelos (Figura 2). Los valores medios de cada una de las variables anatómicas por taxón aparecen en la Tabla 1.





Figura 2. - Cortes con imágenes de concreciones sugestivas de quelatos de color naranja rojizo en acícula de *Pinus tropicalis*. A. en tejido parénquima de transfusión con un aumento de 100X. B. Detalles de A con aumento de 400X. C. en tejido del haz vascular y D. pelo unicelular: modificación de la epidermis con un aumento de 100X

Tabla 1. - Valores medios y desviaciones estándar de las variables anatómicas evaluadas de *Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis*

Variables anatómicas	<i>Pinus caribaea</i>	<i>Pinus tropicalis</i>
Grosor de la cutícula (μm)	3,30 ± 0,32	3,65 ± 0,22
Grosor de la epidermis (μm)	13,01 ± 0,75	19,79 ± 2,61
Número de capas de células de la hipodermis	2,33 ± 0,33	2,33 ± 0,17
Grosor de la hipodermis (μm)	38,25 ± 4,86	33,30 ± 1,99
Número de canales	2,67 ± 0,67	6,11 ± 0,61
Grosor del parénquima clorofílico (μm)	90,43 ± 8,66	96,45 ± 6,8
Grosor del parénquima de transfusión (μm)	99,04 ± 14,45	125,91 ± 8,63
Ancho del haz vascular (μm)	194,40 ± 26,34	333,85 ± 62,53
Altura del haz vascular (μm)	364,72 ± 48,45	266,90 ± 35,09
Número de estomas	18,00	12,00
Grosor de la endodermis (μm)	25,46 ± 3,31	31,49 ± 2,88
Diámetro del canal izquierdo (μm)	42,90 ± 9,94	86,25 ± 9,21
Diámetro del canal derecho (μm)	61,30 ± 6,07	91,89 ± 11,14



DISCUSIÓN

Pinus caribaea subsp. *caribaea*

De manera general, no se observan cambios en la disposición de los tejidos en la estructura anatómica de *P. caribaea* en relación con lo reportado por Pérez-del Valle *et al.* (2020). En ese estudio se comparó la anatomía de *P. caribaea* y *P. tropicalis* como respuesta a las condiciones edafoclimáticas extremas en el mismo ecótopo y las diferencias encontradas se hallan entre las dimensiones de los tejidos y las estructuras secretoras.

Geadá-López *et al.* (2021) analizaron el efecto del ecótopo en la estructura anatómica de la especie *P. caribaea*, para lo cual examinaron muestras de varios sitios que representan todos los ecótopos donde la especie crece formando pinares naturales. Entre ellos, la localidad Valle Ancón, que por su cercanía y características geológicas se podría comparar con el área de muestreo del presente estudio y cabría esperar que los resultados coincidieran. No obstante, se encontraron diferencias entre ambos estudios. El presente muestra un aumento en el grosor de la cutícula y en la altura del haz vascular, además de la disminución del diámetro de los canales derecho e izquierdo, del grosor del parénquima clorofílico y del ancho del haz vascular con respecto a lo reportado por esos autores.

Los cambios en el grosor de la cutícula han sido analizados anteriormente por Le Provost *et al.* (2013) en *Pinus pinaster* Ait. El estudio evaluó el rol de las ceras en la cutícula en la respuesta ante condiciones de sequía y mostró que el grosor y la cantidad de ceras aumentaron ante niveles mayores de sequía, lo que sugiere una adaptación ante el estrés hídrico. En ocasiones, las condiciones de pH bajo en el suelo son percibidas por la planta como una situación de estrés, que activa respuestas análogas a las dadas ante la sequía (Ahmed *et al.*, 2018).

Los análisis químicos realizados en el área de estudio revelaron condiciones de extrema acidez en el suelo y aguas superficiales, con un pH entre 1.5 y 2.0 (Proyecto PS104LH002-022). Esta acidificación incrementa notablemente la biodisponibilidad de metales pesados en la solución del suelo. Para la planta, la toxicidad por metales induce un estrés fisiológico análogo al déficit hídrico (Kim *et al.* 2015), desencadenando respuestas adaptativas comunes, como el engrosamiento de la cutícula foliar.



En cuanto al número de capas de células de la hipodermis y al grosor del parénquima clorofílico, se encontró una disminución respecto a lo documentado por Pérez-del Valle *et al.* (2020) y por Geada-López *et al.* (2021) para el ecotopo similar ecológicamente al estudiado. Aunque para otras especies, con el aumento del estrés hídrico, aumenta el número de capas de la hipodermis y disminuye el grosor del parénquima clorofílico (Nikolić *et al.*, 2014; 2019; Grill *et al.*, 2004).

La reducción del número y diámetro de canales resiníferos forma parte de la respuesta adaptativa ante la baja disponibilidad de agua y nutrientes en diferentes ecótopos de *Pinus sylvestris* L. (Tyukavina *et al.*, 2019). Por su parte, Kalugina *et al.* (2024) analizaron el impacto sobre la estructura anatómica foliar de esta especie que tuvo la contaminación ambiental ocasionada por emisiones de aluminio. Entre los cambios más significativos se documentó la disminución del número de canales resiníferos y su diámetro. En el presente estudio, no detectó variación en el número de canales con lo reportado por Pérez-del Valle *et al.* (2020) y Geada-López *et al.* (2021). Sin embargo, si se apreció una disminución en el diámetro de ambos canales.

Pinus tropicalis

P. tropicalis, la estructura anatómica y la disposición de los tejidos coincide con lo reportado por Pérez-del Valle *et al.* (2020), pero aparecen algunas diferencias en el número de estomas, el número de capas de células de la hipodermis, el número de canales y el grosor del parénquima clorofílico.

Geada-López *et al.* (2022) analizaron el efecto de las diferentes condiciones del ecotopo sobre la estructura anatómica de la especie. En dicho estudio, la localidad Manaja representa el ecotopo similar al área de estudio y, por tanto, cabría esperar un comportamiento semejante en las dimensiones de los tejidos. Sin embargo, se encontraron diferencias como: aumento del grosor de la cutícula y disminución en el número de estomas, el grosor de los parénquimas clorofílico y de transfusión y el diámetro de los canales resiníferos, que entonces pudieran atribuirse al efecto de la contaminación por la actividad minero-metalúrgica.



Al igual que en el caso anterior, las condiciones de bajo pH en el suelo y altas concentraciones de metales son interpretadas como estrés hídrico. Para esta especie sí se aprecia un aumento de la cutícula de conjunto con una disminución del número de estomas, lo cual obedece al comportamiento estándar de la especie en ecotopos extremos, en baja disponibilidad de agua, estudiados por Geada-López *et al.* 2022.

Kalugina *et al.* (2024) reportó reducción en variables anatómicas foliares como el área de la sección transversal y del haz vascular, el grosor de los tejidos del mesófilo de la hoja y el número y diámetro de los canales resiníferos, en función de ingrediente de contaminación atmosférica, en individuos de *Pinus sylvestris* L. Este comportamiento fue similar al observado en este estudio, pero para contaminantes de la minero-metalúrgica. Sin embargo, estos cambios no fueron apreciados previamente por Geada-López *et al.* (2022) en ninguno de los ecotopos naturales de la especie.

Cahuana y Aduvire (2019) y Gómez-Bernal *et al.* (2014) han documentado que los metales pesados disponibles en el suelo de sitios abandonados por la actividad minero-metalúrgica se pueden encontrar en los tejidos. Aparecen formando agregados y donde los metales forman quelatos en granos de almidón del tejido parenquimático o compuestos fenólicos como los taninos, Estos cambios para inmovilizar los metales pesados, que muchos son casos tóxicos para la planta. Aunque este tipo de estudio histológico ha sido muy limitado en el género *Pinus*, el enfoque más común se concentra en analizar la tolerancia o el potencial bioacumulador de *Pinus sylvestris* L. (Comakli y Bingöl, 2021; Kandziora-Ciupa *et al.*, 2016; Pundyté *et al.*, 2011), *P. halepensis* Mill. (Kharazian *et al.*, 2023), *P. nigra* J.F. Arnold (Delian y Săvulescu, 2022), *P. brutia* Ten. (Nuhoglu *et al.*, 2015), entre otros, a través de la determinación química de metales pesados en hojas, corteza y raíz.

En las muestras evaluadas, tanto de *P. caribaea* como de *P. tropicalis*, aparecen imágenes sugestivas de quelatos en los tejidos vasculares, parénquima de transfusión y endodermis. Tienen diferentes formas y son de colores gris oscuro, negro y anaranjado rojizo. Estos tejidos tienen un papel fundamental en la concentración y el movimiento de solutos desde el suelo hasta las partes aéreas de la planta (Gómez-Bernal *et al.*, 2014; Geada-López *et al.*, 2021).



Finalmente, en gran parte de los cortes de *P. tropicalis* se observó una estructura en el tejido epidérmico con forma de pelos o emergencias. La presencia de tricomas o estructuras similares en la epidermis de las acículas no es un rasgo anteriormente descrito en la anatomía de referencia para este género (Pérez-del Valle *et al.*, 2020; Geada-López *et al.*, 2021). Su presencia podría interpretarse como una respuesta morfogenética inducida por estrés, posiblemente dirigida a aumentar la reflectividad de la radiación, reducir la transpiración, constituir una barrera física adicional contra la penetración de partículas o la toxicidad directa de metales en la superficie foliar (Evert, 2006; Vollenweider y Günthardt-Goerg, 2005). Este hallazgo, además de las concreciones sugestivas de quelatos en los tejidos vasculares y de transfusión en ambas especies, son los principales cambios en su arquitectura foliar para contrarrestar el estrés.

En conjunto, los cambios anatómicos observados en *P. caribaea* y *P. tropicalis* van hacia la reducción de los tejidos foliares y la aparición de estructuras epidérmicas diferenciadas y concreciones internas que conforman un perfil de respuesta coherente con un estrés abiótico crónico. Si bien algunas de estas modificaciones, como el engrosamiento de la cutícula, son respuestas comunes a diversos estreses (hídrico o contaminación aérea), su coocurrencia con alteraciones en tejidos vasculares y de transfusión, en un contexto edáfico de alta carga metálica y acidez, fortalece la interpretación de que son adaptaciones específicas a la contaminación minero-metalúrgica en el área de estudio.

CONCLUSIONES

El estudio revela que ambos taxones presentan modificaciones anatómicas foliares asociadas a las condiciones de contaminación minero-metalúrgica en el área de la mina Castellanos, lo que constituye la primera evidencia de este tipo para estas especies en Cuba.

En *Pinus caribaea* subsp. *caribaea*, los principales cambios fueron el aumento del grosor de la cutícula, la disminución del grosor del parénquima clorofílico y del diámetro de los canales resiníferos, junto con la presencia de concreciones intracelulares en tejidos vasculares, parénquima de transfusión y endodermis.



En *Pinus tropicalis*, las modificaciones más notables incluyen el aumento del grosor de la cutícula, la reducción del número de estomas, la disminución del grosor de los parénquimas del mesófilo y del haz vascular, así como la presencia de modificaciones epidérmicas similares a tricomas y de concreciones intracelulares en los tejidos conductores y de transfusión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, I.M., NADIRA, U.A., QIU, C.-W., CAO, F., ZHANG, G., HOLFORD, P. y WU, F., 2018. Tolerance to Drought, Low pH and Al Combined Stress in Tibetan Wild Barley Is Associated with Improvement of ATPase and Modulation of Antioxidant Defense System. *International Journal of Molecular Sciences*, [en línea] vol. 19, no. 11, pp. 3553. ISSN 1422-0067. <https://doi.org/10.3390/ijms19113553>
- ARICAK, B., CETIM, M., ERDEM, R., SEVIK, H. y COMETEN, H., 2019. The change of some heavy metal concentrations in Scotch Pine (*Pinus sylvestris*) depending on traffic density, organelle and washing. *Applied Ecology and Environmental Research* [en línea], vol. 17, no. 3, pp. 6723-6734. Disponible en: https://epa.oszk.hu/02500/02583/00059/pdf/EPA02583_applied_ecology_2019_3_67236734.pdf
- BRUGUERA AMARÁN, N.C., DÍAZ DUQUE, J.A., ÁLVAREZ SANTANDER, J.R., HERNÁNDEZ DÍAZ, R., RAMÍREZ HERNÁNDEZ, R. y GALLARDO MARTÍNEZ, D., 2022. Impacto de los pasivos ambientales en la red hidrográfica de la región minera de Santa Lucía, Minas de Matahambre, Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* [en línea], vol. 43, no. 1, pp. 63-78. [consulta: 17 febrero 2026]. ISSN 1680-0338. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1680-03382022000100063&lng=es&nrm=iso&tlng=es.



- CAHUANA, L. y ADUVIRE, O., 2019. Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería* [en línea], vol. 4, no. 2, pp. 19-36. Disponible en: http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/v4n2/v4n2_a02.pdf
- ÇOMAKLI, E. y BINGÖL, M.S., 2021. Heavy metal accumulation of urban Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantation. *Environmental Monitoring and Assessment*, [en línea] vol. 193, no. 4, pp. 192. ISSN 1573-2959. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08921-6>
- DELIAN, E. y SĂVULESCU, E., 2022. Anatomical and physiological changes in needles of *Pinus nigra* JF Arnold reveal urban traffic air pollution driven effects. *Scientific Papers. Series B, Horticulture* [en línea], vol. 66, no. 1, pp. 674-684. Disponible en: https://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2022/issue_1/Art98.pdf.
- EVERT, R. F. 2006. *Esau's Plant Anatomy: Meristems, cells, and tissues of the plant body - Their structure, function, and development* (3rd ed.). John Wiley y Sons. [en línea] Disponible en: <https://doi.org/10.1002/0470047380>
- EVERT, R.F., 2006. *Esau's Plant Anatomy: Meristems, Cells, and Tissues of the Plant Body: Their Structure, Function, and Development* [en línea]. Canadá: John Wiley & Sons. [en línea] ISBN 978-0-470-04737-8. Disponible en: https://books.google.com/cu/books?id=0DhEBA5xgbkC&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- GEADA LÓPEZ, G. y GARCÍA BELTRÁN, J.A., 2024. Pinaceae. *Catálogo de las Plantas de Cuba* [en línea]. Vancouver: Plantlife Conservation Society, pp. 942-945. [consulta: 23 febrero 2026]. Disponible en: <https://www.planta.ngo/en/pinaceae/>
- GEADA LÓPEZ, G., SOTOLONGO SOSPEDRA, R. y PÉREZ DEL VALLE, L., 2022. Variación anatómica foliar en poblaciones naturales de *Pinus tropicalis* en Pinar del Río, Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, [en línea] vol. 43, pp. 155-170. Disponible en: <https://revistas.uh.cu/rjbn/article/view/211?articlesBySimilarityPage=1>



- GEADA LÓPEZ, G., SOTOLONGO SOSPEDRA, R., PÉREZ DEL VALLE, L. y RAMÍREZ HERNÁNDEZ, R., 2021. Diferenciación anatómica foliar en poblaciones naturales de *Pinus caribaea* var. *caribaea* (Pinaceae) en Pinar del Río y Artemisa, Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional* [en línea], vol. 42, pp. 175-188. [consulta: 23 febrero 2026]. ISSN 0253-5696. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/48672484>
- GÓMEZ BERNAL, J.M., MORTON BERMEA, O., RUIZ HUERTA, E.A., ARMIENTA HERNÁNDEZ, M.A. y DÁVILA GONZÁLEZ, O., 2014. Microscopic evidences of heavy metals distribution and anatomic alterations in breaching-leaves of *Cupressus lindleyi* growing around mining wastes. *Microscopy Research and Technique* [en línea], vol. 77, no. 9, pp. 714-726. ISSN 1097-0029. DOI 10.1002/jemt.22392. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24919681/>
- GRATANI, L., 2014. Plant phenotypic plasticity in response to environmental factors. *Advances in Botany* [en línea], vol. 2014, no. 1, pp. 1-17. [consulta: 23 febrero 2026]. ISSN 2314-7857. DOI 10.1155/2014/208747. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2014/208747>
- GRILL, D., TAUSZ, M., PÖLLINGER, U. t. e., JIMÉNEZ, M.S. y MORALES, D., 2004. Effects of drought on needle anatomy of *Pinus canariensis*. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* [en línea], vol. 199, no. 2, pp. 85-89. [consulta: 23 febrero 2026]. ISSN 0367-2530. DOI 10.1078/0367-2530-00137. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0367253004701012>
- HUANG, Y., MAO, J., CHEN, Z., MENG, J., XU, Y., DUAN, A. y LI, Y., 2016. Genetic structure of needle morphological and anatomical traits of *Pinus yunnanensis*. *Journal of Forestry Research* [en línea], vol. 27, no. 1, pp. 13-25. [consulta: 23 febrero 2026]. ISSN 1993-0607. DOI 10.1007/s11676-015-0133-x. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0133-x>



INFORME PROYECTO PS104LH002-022. 2024. Evaluación del potencial de remediación de los pasivos ambientales con impactos severos sobre los ecosistemas en distritos minerales de la provincial Pinar del Río. 2024. Programa sectorial CTI Caracterización integral de la geología de Cuba.

KALUGINA, O.V., AFANASYEVA, L.V. y MIKHAILOVA, T.A., 2024. Anatomical and morphological changes in *Pinus sylvestris* and *Larix sibirica* needles under impact of emissions from a large aluminum enterprise. *Ecotoxicology* [en línea], vol. 33, no. 1, pp. 66-84. [consulta: 23 febrero 2026]. ISSN 1573-3017. DOI 10.1007/s10646-023-02723-x. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10646-023-02723-x>

KANDZIORA CIUPA, M., CIEPAŁ, R., NADGÓRSKA SOCHA, A. y BARCZYK, G., 2016. Accumulation of heavy metals and antioxidant responses in *Pinus sylvestris* L. needles in polluted and non-polluted sites. *Ecotoxicology* [en línea], vol. 25, pp. 970-981. [consulta: 23 febrero 2026]. ISSN 0963-9292. DOI 10.1007/s10646-016-1654-6. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4879171/>

KHARAZIAN, P., BACCHETTA, G., CAPPAL, G., PIREDDAC, M. y GIUDICIA, G.D., 2023. An integrated geochemical and mineralogical investigation on soil-plant system of *Pinus halepensis* pioneer tree growing on heavy metal polluted mine tailing. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, [en línea] vol. 157, no. 2, pp. 272-285. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/11263504.2022.2100502>

KIM, R.-Y., YOON, J.-K., KIM, T.-S., YANG, J.E., OWENS, G. y KIM, K.-R., 2015. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation – a critical review. *Environ Geochem Health*, [en línea] vol. 37, no. 6, pp. 1041-61. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-015-9695-y>



- KORD, B. y KORD, B., 2011. Heavy metal levels in pine (*Pinus eldarica* Medw.) tree barks as indicators of atmospheric pollution. *BioResources*, [en línea] vol. 6, no. 2, pp. 927-935. Disponible en: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/heavy-metal-levels-in-pine-pinus-eldarica-medw-tree-barks-as-indicators-of-atmospheric-pollution/>
- LEGHARI, S.K. y ZAIDI, M.A., 2013. Effect of air pollution on the leaf morphology of common plant species of Quetta city. *Pakistan Journal of Botany*, [en línea] vol. 45, no. S1, pp. 447-454. Disponible en: [https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/45\(S1\)/59.pdf](https://www.pakbs.org/pjbot/PDFs/45(S1)/59.pdf)
- NCUBE, E. y PHIRI, B., 2015. Concentrations of heavy metals in Eucalyptus and Pinus wood sawdust and smoke, Copperbelt province, Zambia. *Maderas Ciencia y Tecnología*, [en línea] vol. 17, no. 3, pp. 585-596. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2015005000052&script=sci_arttext
- NIKOLIĆ, B.M., BOJOVIC, S. y MARIN, P., 2014. Morpho-anatomical properties of *Pinus heldreichii* needles from natural populations in Montenegro and Serbia. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, [en línea] vol. 150, no. 2, pp. 1-10. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/11263504.2014.984008>
- NIKOLIĆ, B.M., MITIĆ, Z.S., BOJOVIC, S., MATEVSKI, V., KRIVOSEJ, Z. y MARIN, P., 2019. Variability of needle morpho-anatomy of natural *Pinus heldreichii* populations from Scardo-Pindic mountains. *Genetika*, [en línea] vol. 51, no. 3, pp. 1175-1184. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339174580_Variability_of_needle_morpho-anatomy_of_natural_Pinus_heldreichii_populations_from_Scardo-Pindic_mountains
- NUHOĞLU, Y., YILDIRIM, Y. y DÜNDAR, M., 2015. The Cross-section Variations in Red Pine (*Pinus brutia* Ten.) Needles as an Indicator of Atmospheric Pollution: Gökova Thermal Power Plants. *Eurasian Journal of Forest Science*, [en línea] vol. 3,



no. 1, pp. 29-36. Disponible en:
<https://dergipark.org.tr/en/pub/ejejfs/article/70191>

PÉREZ DEL VALLE, L., GEADA LÓPEZ, G. y SOTOLONGO SOSPEDRA, R., 2020. Anatomía foliar comparada de *Pinus caribaea* var. *caribaea* y *P. tropicalis* (Pinaceae) en asociación simpátrica., [en línea] *Revista del Jardín Botánico Nacional*, [en línea] vol. 41, pp. 163-174. Disponible en:
<https://dergipark.org.tr/en/pub/ejejfs/article/70191>

PUNDYTĚ, N., BALTRĚNAITĚ, E., PEREIRA, P. y PALIULIS, D. 2011. Anthropogenic effects on heavy metals and macronutrients accumulation in soil and wood of *Pinus sylvestris* L. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, [en línea] vol. 19 no. 1, pp. 34-43. Disponible en;
<https://doi.org/10.3846/16486897.2011.557473>

TSUKAYA, H., 2013. Leaf development. *The Arabidopsis Book* [en línea], vol. 2013, no. 11, Disponible en: <https://bioone.org/journals/the-arabidopsis-book/volume-2013/issue-11/tab.0163/Leaf-Development/10.1199/tab.0163.full>.

TYUKAVINA, O.N., NEVEROV, N.A. y KLEVTSOV, D.N., 2019. Influence of growing conditions on morphological and anatomical characteristics of pine needles in the northern taiga. *Journal of Forest Science*, [en línea] vol. 65, no. 1, pp. 33-39. Disponible en: https://jfs.agriculturejournals.cz/artkey/jfs-201901-0006_influence-of-growing-conditions-on-morphological-and-anatomical-characteristics-of-pine-needles-in-the-northern.php

VOLLENWEIDER, P. y GÜNTHARDT-GOERG, M.S., 2005. Diagnosis of abiotic and biotic stress factors using the visible symptoms in foliage. *Environmental Pollution*, [en línea] vol. 137, no. 3, pp. 455-465. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749105001193>

WROŃSKA-PILAREK, D., KRYSZTOFIK-KANIEWSKA, A., MATUSIAK, K., BOCIANOWSKI, J., WIATROWSKA, B. y OKOŃSKI, B. 2023. Does distance from a sand mine affect needle features in *Pinus sylvestris*?. *Forest Ecology and*



Management, [en línea] vol. 546, pp. 121-276. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121276>

ZHANG, M., MENG, J.-X., ZHANG, Z.-J., ZHU, S.-L. y LI, Y., 2017. Genetic analysis of needle morphological and anatomical traits among nature populations of *Pinus tabuliformis*. *Journal of Plant Studies* [en línea], vol. 6, no. 1, Disponible en:
<https://www.ccsenet.org/journal/index.php/jps/article/view/64939>

Conflictos de intereses:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial
4.0 Internacional.

