

# Relationship between mechanical stress caused by wind and the spread of the fungus *Kretzschmaria zonata* in *Tectona grandis* commercial plantations

Nazaret Aguilar Villalobos, estudiante<sup>1</sup>, Víctor Céspedes Cordero, estudiante<sup>2</sup>, Krissel Gamboa Alfaro, estudiante<sup>3</sup>  
, Valentina Velásquez Hernández, estudiante<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, [mieaguilar@estudiantec.cr](mailto:mieaguilar@estudiantec.cr), [vcespe@estudiantec.cr](mailto:vcespe@estudiantec.cr), [krisselalina@estudiantec.cr](mailto:krisselalina@estudiantec.cr), [vvelasquez@estudiantec.cr](mailto:vvelasquez@estudiantec.cr)

Mentor: Gustavo Richmond Navarro, PhD<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, [grichmond@tec.ac.cr](mailto:grichmond@tec.ac.cr)

**Abstract-** The research study aims to demonstrate the relationship between mechanical damage caused by wind force and the susceptibility of *Tectona grandis* trees to infection by the fungus *Kretzschmaria zonata*. To achieve this, wind speed measurements were taken using anemometers at different altitudes above sea level; the force incidence index was determined based on velocity data; the correlation between wind-induced mechanical damage and susceptibility to fungal infection was analyzed; and possible mitigation strategies were discussed. The main result indicated that as the wind force magnitude increased, the spread of the fungus in trees also increased, confirming the initial hypothesis. Finally, possible mitigation strategies are proposed to optimize economic gains and maximize the ecological benefits offered by teak.

**Keywords-** Fungus *Kretzschmaria zonata*, disease, *Tectona grandis* (teak) tree, mechanical damage, wind force.

# Relación del estrés mecánico ocasionado por el viento y la afectación de *Kretzschmaria zonata* en plantaciones comerciales de *Tectona grandis*

Nazaret Aguilar Villalobos, estudiante<sup>1</sup>, Víctor Céspedes Cordero, estudiante<sup>2</sup>, Krissel Gamboa Alfaro, estudiante<sup>3</sup>, Valentina Velásquez Hernández, estudiante<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, [mieaguilar@estudiantec.cr](mailto:mieaguilar@estudiantec.cr), [vcspe@estudiantec.cr](mailto:vcspe@estudiantec.cr), [krisselalina@estudiantec.cr](mailto:krisselalina@estudiantec.cr), [vvelasquez@estudiantec.cr](mailto:vvelasquez@estudiantec.cr)

Mentor: Gustavo Richmond Navarro, PhD<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, [grichmond@tec.ac.cr](mailto:grichmond@tec.ac.cr)

**Resumen-**Esta investigación tiene como objetivo validar la relación entre el daño mecánico ocasionado por la fuerza del viento con la susceptibilidad del árbol *Tectona grandis* a la infección por el hongo *Kretzschmaria zonata*. Para ello, se tomaron mediciones de la velocidad del viento por medio de anemómetros a diferentes alturas sobre el nivel del mar; se determinó el índice de la incidencia de fuerza según los datos de velocidad; se analizó la correlación del daño mecánico producido por el viento con la susceptibilidad al contagio del hongo; y se discutieron posibles estrategias de mitigación. Como resultado principal, se obtuvo que, a mayor magnitud de fuerza de viento, aumentaba la propagación del hongo en los árboles, lo cual confirma la hipótesis planteada. Finalmente, se proponen posibles estrategias de mitigación para optimizar las ganancias económicas y maximizar los beneficios ecológicos que la teca ofrece.

**Palabras clave:** Hongo *Kretzschmaria zonata*, enfermedad, árbol *Tectona grandis* (teca), daño mecánico, fuerza del viento.

## I. INTRODUCCIÓN

La madera del *Tectona grandis* L. f. (teca) es considerada una de las especies más valiosas del mundo debido su estética, durabilidad y resistencia [1]. Este árbol es reconocido por su uso para la construcción de mueblería, barcos e instrumentos para la industria naval debido a sus propiedades físicas [2].

Adicionalmente, la teca es utilizada comúnmente para la reforestación en Latinoamérica. En Costa Rica, este árbol es la principal especie plantada con este objetivo junto a *Gmelina arborea* (melina) [3]. Respecto a su impacto económico, la exportación de esta madera representa una fuente importante de ingresos para la región. Actualmente, en el país se tienen plantaciones activas en las provincias de Guanacaste, San José, Alajuela, Cartago, Heredia, Puntarenas y Limón con propósito de reforestación y comercialización [4].

A pesar de sus beneficios, esta especie se enfrenta a una amenaza: las enfermedades originadas por patógenos; entre ellas, el hongo *Kretzschmaria zonata* (Lév.) P.M.D. Martin. Según [5] este hongo fue reportado oficialmente por primera vez en Costa Rica en el año 2024. No obstante, a nivel de laboratorio, ya se tenía conocimiento de su presencia en el país en la provincia de Guanacaste. Este hongo produce pudrición en la raíz y cuello del árbol hasta provocar la muerte del individuo. A medida que la enfermedad avanza, de acuerdo con [6],

la madera del árbol se vuelve débil y corchosa, lo cual no permite su comercialización.

Tradicionalmente, se ha visto al viento como un factor de contagio debido a que es un medio de propagación de esporas [6], sin embargo, no se ha explorado a profundidad la relación entre el daño mecánico producido por el viento y la predisposición del árbol a este patógeno. Esta hipótesis fue propuesta cuando el hongo fue identificado en México [2], pero no investigada en detalle.

En la región de Limonal, Guanacaste, se realizó un estudio visual, sin datos recopilados, donde se observa una mayor prevalencia del hongo a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar. No obstante, debido a la falta de evaluación cuantitativa, no se puede afirmar esta tendencia de manera concluyente. Por lo tanto, para comprobar la hipótesis mencionada, se mide la velocidad del viento a diferentes alturas sobre el nivel del mar mediante el uso de anemómetros. Posteriormente, se calcula la fuerza de arrastre del viento utilizando la ecuación de arrastre (1) y se analiza su correlación con la prevalencia del hongo. Se debe tener en cuenta que esta relación es observada a través de la correlación y no implica causalidad, ya que otros factores podrían influir en la prevalencia del hongo, de acuerdo con los estudios realizados en [5]. Finalmente, se discuten posibles estrategias de mitigación.

El objetivo principal de este trabajo es validar la hipótesis sobre el impacto del estrés mecánico causado por el viento en el árbol de teca y su influencia en la predisposición a la infección por este patógeno, pues esto es fundamental para desarrollar estrategias de prevención y mitigación de contagio. Con ello, se busca minimizar las pérdidas económicas y continuar eficazmente con el proceso de reforestación.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### A. Importancia del *Tectona grandis* en América Latina

El árbol *T. grandis* es una latifoliada tropical que pertenece a la familia Verbenaceae y es nativa del sudeste de Asia donde alcanza una altura promedio de 50 metros y un diámetro de hasta 2 metros [2]. En América Latina, fue introducida a Trinidad y Tobago entre los años 1913-1916, con semillas procedentes de Myanmar y distribuyéndose posteriormente en Belice, Bolivia, Brasil, Colombia, y Costa Rica, entre otros [1].

En el reporte del estado actual de los cultivos de teca en América Latina [7], su cultivo sigue considerándose reciente debido a que el 77% de las plantaciones actuales tiene menos de 20 años. A pesar de ello, los cálculos de rentabilidad indican que la comercialización de esta madera es económicamente viable, con un valor productivo positivo. El estudio concluye que la Tasa Interna de Retorno (TIR) promedio es del 13%.

Adicional a sus beneficios económicos, la teca también proporciona beneficios ecológicos. La fijación de carbono a través de su cultivo es una opción factible y efectiva para disminuir el incremento del dióxido de carbono en la atmósfera. En [8] se muestra un estudio realizado en México, donde se midió el carbono y dióxido de carbono almacenado en una plantación entre 4 y 5 años. Como resultado, se obtuvo un promedio de 66.410 toneladas por hectárea y 107.179 toneladas por hectárea, demostrando la posibilidad de esta alternativa.

#### B. *Kretzschmaria zonata*

Uno de los principales riesgos que enfrenta la teca son las enfermedades fitosanitarias. En Costa Rica, la distribución de plagas y enfermedades forestales es la siguiente: el 75% corresponde a insectos, 20% a patógenos, 4% a animales vertebrados y 1% a muérdagos. Entre ellos, el 22.9% del total de los patógenos ataca principalmente la base del árbol, mientras que el 11.5% la raíz [9]. El hongo *Kretzschmaria zonata* es parte de estas cifras y fue oficialmente reportado en 2024 en el país [5]. En otros países de América Latina, como México y Brasil, ya se tenía conocimiento de su existencia y ha sido estudiado a mayor profundidad [1, 6].

Este patógeno genera la pudrición de la raíz y cuello del árbol formando una placa estromática que provoca lentamente su muerte. Inclusive, es posible observar ejemplares asintomáticos que no tienen cambios de apariencia en su follaje hasta que la pudrición avanza en la base del tronco. Al llegar a este punto, el daño es irreversible [1].

Cuando un árbol se encuentra infectado, los principales síntomas que presenta son hojas de menor tamaño que el común con color amarillento o café pálido. Posteriormente, estas se marchitan y el árbol muere. Las plantaciones infectadas presentan manchas en la madera y reducción en su crecimiento [6].

En la mayoría de los árboles, esta enfermedad se manifiesta entre la base del tallo y el cuello de la raíz, formando un tejido calloso. En la parte baja, se desarrolla el estroma de manera superficial. Esto desencadena una pudrición de la madera del sistema radical y debilita la base del tronco. La pudrición de la raíz alcanza el cuello del árbol y causa el bloqueo del paso de líquidos por el floema. Como consecuencia, se produce el tejido calloso oscuro en el tronco característico de este hongo, y la corteza adquiere una textura húmeda y débil [2].

Adicionalmente, el *K. zonata* se alimenta de la pared celular secundaria. Con el paso del tiempo, esto provoca que el árbol pierda resistencia y adquiera un tejido blando inducido por la pudrición interna y descomposición de la celulosa [6]. A medida que la enfermedad avanza, se da un proceso de mortalidad secuencial, concluyendo con árboles muertos sin ramas.

La entrada del hongo al árbol se da principalmente por la raíz. La formación de raíces secundarias o heridas abiertas

producidas por el daño mecánico facilitan la entrada de patógenos al árbol [1].

Como consecuencia final, el hongo genera repercusiones económicas graves para los productores de esta madera, ya que, según [1], las principales mortalidades ocurren en individuos de entre 4 y 8 años; sin embargo, también se han observado casos en árboles de mayor edad, lo que limita la posible ganancia económica que se obtiene de estos cultivos. En el reporte [6], se señala que la aparición del *K. zonata* es una amenaza para la sostenibilidad de las plantaciones comerciales de la teca.

#### C. *Evaluación de la prevalencia del hongo en Limonal*

Para el género *Kretzschmaria*, se han descrito 28 especies distribuidas en regiones templadas y tropicales. En Costa Rica, el primer reporte oficial publicado de la identificación de la especie *K. zonata* y sus síntomas en los cultivos de la teca se realizó en el 2024. En el estudio, la patogenicidad se comprobó mediante los postulados de Koch. Lo anterior, con muestras tomadas en plantaciones ubicadas en la provincia de Guanacaste, específicamente en Cañas (árboles de 13 años), Limonal (árboles de 7 años) y Coyolito (árboles de 5 años) [5].

De acuerdo con [10] se profundizó en la prevalencia del *K. zonata* en Limonal. Se ha observado una mayor prevalencia de este patógeno en las plantaciones situadas en sitios con pendientes pronunciadas. Por lo tanto, resulta clave entender cuáles factores externos están relacionados al contagio y la predisposición del árbol al hongo para contrarrestar su efecto. Las Fig. 1, 2 y 3, tomadas en el lugar de estudio muestran cómo el hongo afecta al árbol en la región de Limonal, Guanacaste.



Fig. 1 Corte transversal en madera de *Tectona grandis* infectado con el hongo *Kretzschmaria zonata* visto desde la parte superior [10].



Fig. 2 Ascoma de *K. zonata* en lacorteza de un árbol de *T. grandis* infectado [10].



Fig. 3 Síntomas de pudrición de la base de un árbol de *T. grandis* causados por *K. zonata* [10].

#### D. Efectos adversos en los árboles provocados por el viento

Previamente, según [11], se ha estudiado la respuesta fisiológica de los árboles al daño mecánico ocasionado por el viento. Esta investigación define el estrés primario como la fuerza del viento aplicada al árbol, el cual genera deformaciones como la falla del tronco y las raíces, el pandeo del tronco y la ruptura de las ramas. Se afirma que conforme la magnitud del estrés primario, refiriéndose a la rapidez del viento, aumenta, también lo hacen las deformaciones, y las respuestas fisiológicas de los árboles.

De acuerdo con [11], cuando la exposición crónica a estrés primario es insuficiente para resultar en la falla total del tronco, se originan deformaciones plásticas en el tronco y raíces del árbol, debilitando la resistencia mecánica de las raíces e induciendo el material a la fatiga.

En [12] se analiza la contribución del viento al contagio de la enfermedad citrus canker, provocado por la bacteria *Xanthomonas axonopodis*, notando que este factor favorece tanto su dispersión como su entrada en árboles previamente afectados. Por un lado, esta bacteria se esparce por medio de la lluvia, donde el viento logra esparcir la infección dentro de un radio de

50 km. Por otro lado, el daño mecánico producido a las hojas de los árboles sirve de punto de entrada para la bacteria a los individuos en el rango de propagación.

En [12] se resalta la importancia de entender el efecto del viento con el fin de optimizar las plantaciones, donde se propone diseñar sistemas de rompevientos que contrarresten el efecto de las altas velocidades; para estudiar esto, la investigación formula un experimento donde se exponen los árboles a diferentes velocidades de viento, generadas por ventiladores axiales, para luego evaluar el daño mecánico ocasionado. Este experimento permitió determinar el rango de velocidades donde los árboles se volvían más susceptibles a la bacteria.

### III. METODOLOGÍA

#### A. Recopilación de datos

Con el fin de recopilar datos de la velocidad del viento a diferentes alturas en las plantaciones de teca, donde se identificó el hongo, se colocaron dos anemómetros de copas Davis 6410, cuyas especificaciones se presentan en la Tabla I.

TABLA I  
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ANEMÓMETRO DAVIS 6410 [13]

Rango medición velocidad del viento (m/s)	0.5 – 89
Exactitud (m/s)	$\pm 1.0$
Resolución (m/s)	0.1

Los anemómetros se ubicaron uno a 100 metros sobre el nivel del mar, en la falda de la montaña, y el otro a 135 metros sobre el nivel del mar en la cima de la montaña. En la Fig. 4, se evidencia la instalación de los anemómetros.

En este informe de ahora en adelante se referirá al anemómetro ubicado a 135 metros sobre el nivel del mar como “alto” y al de 100 metros sobre el nivel del mar como “bajo”. Su posición relativa se observa en la Fig. 5. Estos se instalaron en noviembre del 2022 y recolectaron datos diariamente hasta mayo del 2023, debido a que estos son los meses cuando hay más viento en la zona [14]. Para la recolección de datos se utilizó el *datalogger* Davis 6318 Envoy8X, el cual es capaz de recopilar simultáneamente datos de 8 estaciones, en intervalos desde los 30 segundos [15].



Fig. 4 Anemómetro Davis 6410 instalado en Limonal, Guanacaste, Costa Rica



Fig. 5 Posición relativa de anemómetros, coordenadas (10°08'48"N, 84°56'10" O) y (10°08'57"N, 84°56'12"O)

### B. Fuerza del viento

Con el fin de comparar la fuerza del viento experimentada por los árboles a ambas alturas sobre el nivel del mar se utilizó la ecuación de arrastre [16] (1).

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (1)$$

Donde

- $F_D$  es la fuerza de arrastre [N]
- $\rho$  es la densidad aire [ $kg/m^3$ ]
- $v$  representa la velocidad del viento [m/s]
- $C_D$  es el coeficiente de arrastre del árbol [adimensional]
- $A$  corresponde al área de la superficie expuesta al viento [ $m^2$ ]

Para este artículo, los valores de área y coeficiente de arrastre se consideran constantes, puesto que se está estudiando la misma especie de árbol en etapas similares de crecimiento. Además, se desprecia la variación en la densidad del aire y la temperatura ya que el cambio está entre los 100 metros sobre el nivel del mar y los 135 metros sobre el nivel del mar y no resulta significativo. Con lo anterior, el único parámetro variable es la velocidad del viento correspondiente a cada altura.

La segunda variable considerada fue la frecuencia de cada velocidad del viento registrada durante los 5 meses, para lo cual se definió la incidencia de la fuerza de arrastre ( $F_f$ ) por medio de (2).

$$F_f = \sum f v^2 \quad (2)$$

Donde

- $f$  es la frecuencia absoluta de cada velocidad de viento registrada en ese mes

Este cálculo se llevó a cabo utilizando los datos obtenidos por los anemómetros instalados a ambas alturas y se calculó para cada mes por separado. Los datos del anemómetro alto se identifican con el subíndice “a” mientras que los del anemómetro bajo se identifica con el subíndice “b”; la incidencia de la fuerza se calculó de manera individual para cada mes del análisis.

Debido a que la velocidad del viento aumenta con la altura, se espera que los árboles a mayores altitudes experimenten mayores fuerzas de arrastre. Para reflejar esta diferencia, se definió un Índice de incidencia de la fuerza ( $I_F$ ), expresado en (3).

$$I_F = \frac{\sum_a F_{F(a)}}{\sum_b F_{F(b)}} \quad (3)$$

Si  $I_F > 1$ , significa que los árboles a mayor altura reciben una fuerza mayor.

Se añade la condición de que  $v > 0$  m/s para el cálculo de la incidencia de la fuerza de arrastre. Los intervalos de tiempo donde  $v = 0$  m/s se definen como “periodos de calma”, los cuales se analizaron por separado, observando su frecuencia relativa y comparándolas para ambas alturas.

## III. RESULTADOS

### A. Resultados velocidad del viento

Tras procesar los datos recopilados por ambos anemómetros, se presentan las Fig. 7, 8, 9, 10 y 11 con los histogramas que comparan la frecuencia de cada valor de velocidad registrado para los anemómetros.

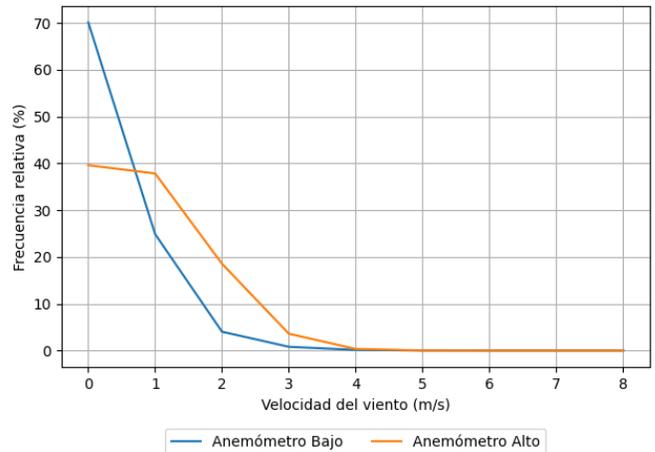


Fig. 6 Comparación de la velocidad del viento registrada a ambas alturas, noviembre 2022

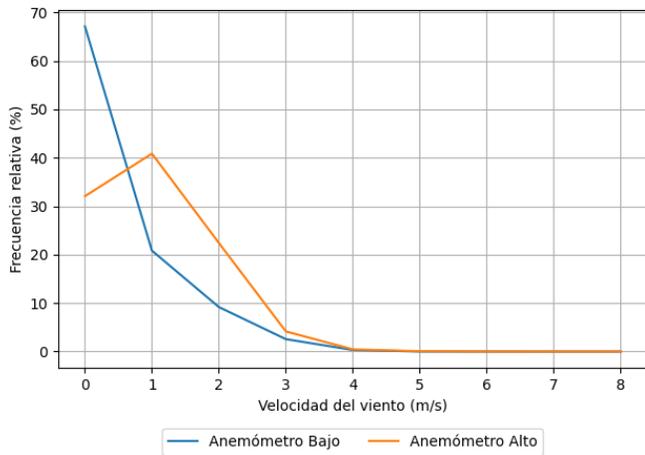


Fig. 7 Comparación de la velocidad del viento registrada a ambas alturas, diciembre 2022

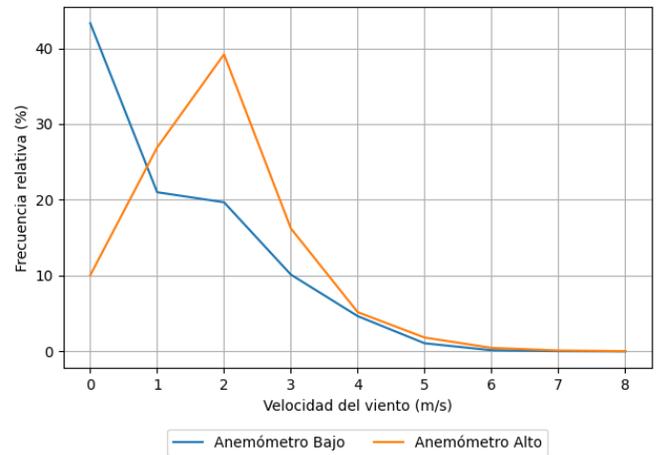


Fig. 10 Comparación de la velocidad del viento registrada a ambas alturas, marzo 2023

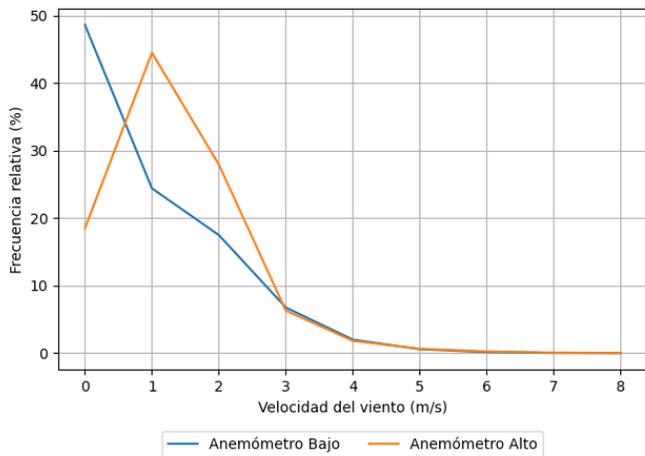


Fig. 8 Comparación de la velocidad del viento registrada a ambas alturas, enero 2023

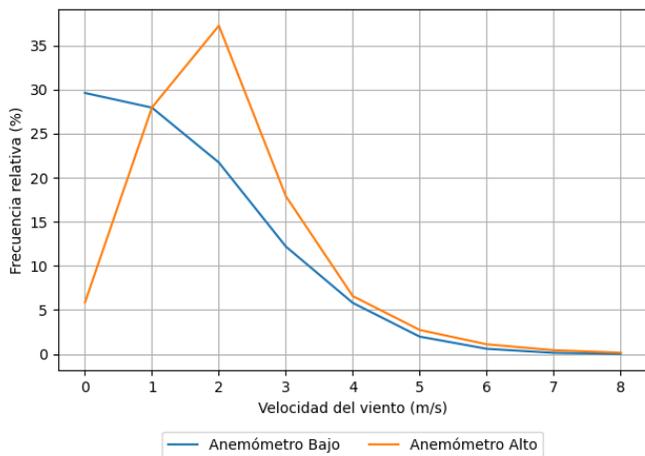


Fig. 9 Comparación de la velocidad del viento registrada a ambas alturas, febrero 2023

En los histogramas de las Fig. 6, 7, 8, 9 y 10, se evidencian velocidades de viento mayores en la cima de la montaña. Esto es coherente con la hipótesis planteada para la investigación.

**B. Índice de incidencia de la fuerza**

En la Tabla II, se presentan los datos de frecuencia y el cálculo de la incidencia de la fuerza de arrastre para cada velocidad reportada en ambos anemómetros durante el mes de enero del 2023.

TABLA II  
FUERZA DE ARRASTRE SEGÚN LA ALTURA EN ENERO 2023

$v$ (m/s)	Anemómetro bajo			Anemómetro alto		
	$f_b$	$v^2$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$F$ (N)	$f_b$	$v^2$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$F$ (N)
1	0.17	1	0.17	0.27	1	0.27
2	0.07	4	0.27	0.07	4	0.29
3	0.02	9	0.19	0.02	9	0.16
4	0.01	16	0.09	0.01	16	0.10
5	0.00	25	0.04	0.00	25	0.06
6	0.00	36	0.01	0.00	36	0.03
7	0.00	49	0.00	0.00	49	0.01
8	0.00	64	0.00	0.00	64	0.00
$F_F$ (N)	0.77			0.93		

En la Tabla II, se puede observar que la incidencia de fuerza en el anemómetro bajo fue de 0.77 newtons, mientras que el dato en el anemómetro alto fue de 0.93 newtons; esto demuestra que los árboles en la zona más alta sufrieron una mayor fuerza de arrastre. Se realizaron los cálculos mostrados en la Tabla II para cada mes y se presentan los resultados relevantes de este cálculo en la Fig. 11, donde se muestra la fuerza de incidencia alcanzada en la zona alta y baja durante cada mes de análisis.

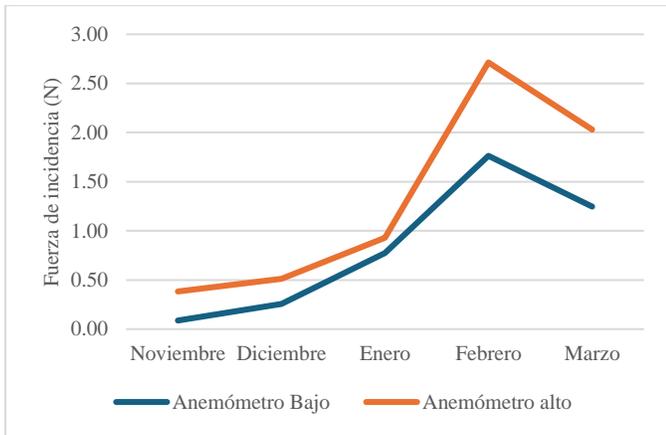


Fig. 11 Incidencia de la fuerza de arrastre para todos los meses de análisis

Adicionalmente, se realizó una tabla análoga para cada mes de los 5 meses de recolección de datos, posteriormente se utilizó (3) para calcular el  $I_F$  para cada mes, cuyos resultados se muestran en la Tabla III.

TABLA III  
ÍNDICE DE INCIDENCIA DE LA FUERZA POR MES

Mes	$I_F$
Noviembre 2022	4.4
Diciembre 2022	2.0
Enero 2023	1.2
Febrero 2023	1.5
Marzo 2023	1.6

La Tabla III muestra que durante el mes de noviembre se obtuvo el mayor  $I_F$ , mientras que en enero se obtuvo el menor, sin embargo, en todos los casos el índice es mayor que 1, lo cual implica que durante todos los meses las zonas más altas experimentan una mayor fuerza de arrastre.

#### C. Periodos de calma

Se definieron previamente los periodos de calma como aquellos donde la velocidad del viento registrada fue de 0 metros sobre segundo. Durante estos, los árboles no experimentan estrés mecánico alguno debido al viento, por lo cual resulta clave evaluar la frecuencia de estos periodos en ambas alturas estudiadas. La Fig. 12 expone la frecuencia mensual de estos periodos para cada altura, en la cual se puede observar cómo consistentemente el anemómetro bajo registraba periodos de calma mayores que el anemómetro alto, lo cual es coherente con la hipótesis planteada de que los árboles a mayor altura son susceptibles a un mayor daño mecánico.

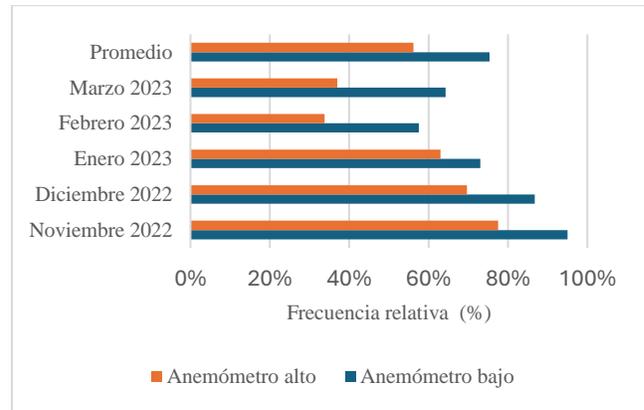


Fig. 12 Frecuencia mensual relativa para periodos de calma

En promedio, el anemómetro bajo registró periodos de calma durante el 75% del tiempo de muestra, mientras que el anemómetro alto registró un 56% de estos.

## IV. DISCUSIÓN

### A. Correlación de la velocidad del viento con el daño mecánico

Los índices de incidencia expuestos en la Tabla III muestran que la fuerza del viento ejercida sobre los árboles por el viento aumenta progresivamente con la altitud, dado que  $I_F > 1$  en todos los casos. Este comportamiento es consistente con la hipótesis planteada y con los estudios previos expuestos en la revisión bibliográfica.

La referencia [11] menciona que conforme aumenta el estrés primario también lo harán las deformaciones mecánicas en los árboles sometidos a este. Considerando que la fuerza de arrastre provocada por el viento constituye un estrés primario, con los datos obtenidos se puede inferir que los árboles a mayores altitudes desarrollan deformaciones más significativas con el paso del tiempo que sus contrapartes plantadas a menores altitudes.

Por una parte, los árboles a mayores altitudes experimentan fuerzas de arrastre significativamente mayores, lo cual se evidencia con un promedio de 2.1 obtenido de la Tabla III. De igual manera, se indica en [11] que la exposición crónica a estrés mecánico resulta en deformaciones plásticas. Esto significa que se reduce la resistencia de su estructura, aumentando la susceptibilidad a fallas mecánicas. Las Fig. 8, 9 y 10 poseen una tendencia similar en la velocidad del viento a la que se ven expuestos, donde los árboles a mayor altura experimentan principalmente esfuerzos provocados por vientos de 2 metros sobre segundo. La exposición constante a estos esfuerzos podría provocar deformaciones plásticas y fatiga en el tronco y las raíces de estos árboles.

Además, respecto a la frecuencia de exposición al estrés, en la Fig. 12 se muestra cómo los árboles a bajas alturas solo se ven expuestos a esfuerzos mecánicos durante un 25% del tiempo, mientras que los que se encuentran a mayores alturas lo hacen un 44% del tiempo.

Dichas deformaciones, como menciona [1], implican un aumento en la vulnerabilidad a la infección por patógenos.

Entonces, el viento no solo favorece el contagio de patógenos debido a su papel en la propagación de esporas, como se menciona en [12], sino que también podría favorecer la susceptibilidad a la infección por hongos al crear puntos de entrada por medio de daños mecánicos.

### B. Limitaciones

Al no haber realizado mediciones directas del daño mecánico en los árboles afectados en ambas alturas, no es posible establecer una relación causal absoluta entre el aumento en el estrés mecánico y la mayor incidencia del *K. zonata*. Aun así, los hallazgos presentados en este informe sugieren la factibilidad de la hipótesis de que el esfuerzo mecánico facilita el contagio del patógeno, y justifica la realización de futuras investigación con esta como base.

En este sentido, es importante profundizar en las limitaciones del estudio, especialmente en cuanto a la falta de mediciones directas del daño mecánico a los árboles y la necesidad de experimentos controlados para confirmar la causalidad. La falta de estos elementos impide establecer definitivamente una relación entre el estrés eólico y la transmisión fúngica, lo que pone de relieve la necesidad de estudios más rigurosos y controlados.

Con el fin de validar completamente la hipótesis, se propone la realización de futuras investigaciones donde se cuantifique el daño mecánico presente en los árboles afectados, y se realicen experimentos tomando como referencia la metodología utilizada en [12]. Se propone que los árboles se expongan a velocidades de viento controladas, con el fin de identificar el rango de velocidades para las cuales el aumento de la susceptibilidad al hongo se vuelve significativo. Adicionalmente, se recomienda realizar mediciones en campo de fracturas y deformaciones plásticas presentes en los árboles afectados y árboles sanos, en ambas alturas.

Como otra opción, se sugiere realizar simulaciones de dinámica de fluidos (CFD) para lograr cuantificar y predecir el impacto del viento en el patrón actual de plantaciones, utilizando modelos similares a los presentados por [17], cuyo objetivo era predecir la trayectoria de las esporas, pero en este caso se podría utilizar para definir cuáles árboles están más expuestos a estrés mecánico ocasionado por el viento. Mediante el uso de CFD sería posible proponer patrones de plantaciones que ofrezcan mayor protección al daño mecánico ocasionado por el viento en la zona, siguiendo un análisis similar al utilizado al diseñar parques eólicos. Para esto, sería necesario tomar datos tanto de la rapidez como de la dirección del viento por un periodo de tiempo significativo, haciendo uso de una mayor cantidad de anemómetros.

Con lo anterior, se resalta la importancia del trabajo interdisciplinario entre las ciencias forestales y la ingeniería mecánica, con el fin de responder adecuadamente a problemáticas cuyas consecuencias tienen dimensiones tanto económicas como medioambientales.

### C. Estrategia de mitigación: rompevientos

Con el fin de mitigar el daño mecánico, y sus implicaciones tanto ambientales como económicas, se propone como estrategia de mitigación el diseño de rompevientos.

Los rompevientos son herramientas habitualmente utilizadas en la agricultura [18], con el fin de reducir la velocidad del viento a lo largo de grandes áreas. Estos son efectivos cuando se orienta de forma perpendicular al viento, y el principal factor a tomar en cuenta a la hora de diseñarlos es su altura.

Inclusive, existen alternativas de rompevientos naturales. Es posible utilizar otras especies de vegetación con mayor resistencia al viento como rompevientos, pero esto puede resultar en una pérdida económica al tener que invertir más recursos en el mantenimiento de otras especies, las cuales ocupan terreno que podría haber sido utilizado para la plantación de teca. Además, esta estrategia no es factible en el caso de los árboles de teca ya que esta especie es alelopática [19], lo que significa que tiene mecanismos para impedir el crecimiento de otro tipo de vegetación a su alrededor, con el fin de reducir la competencia por los recursos, por lo cual afectaría a los árboles sembrados como rompevientos.

Por esto, se tendría que optar por rompevientos artificiales, donde el principal reto de diseño sería cómo adaptarlos a un terreno montañoso como el de la mayoría de Costa Rica, para este proceso de diseño también se sugiere el uso de CFD con el fin de predecir el impacto real de los rompevientos y definir un posicionamiento estratégico de estos. Adicional a lo anterior, se deberá definir un rango de altitud donde el estrés mecánico se vuelve un factor significativo para el contagio de *K. zonata*, para lo cual se recomienda la colocación de anemómetros a diferentes alturas donde se haya identificado el hongo y replicar el procesamiento de datos realizado en este artículo.

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta investigación, se consiguió medir la velocidad del viento a diferentes alturas sobre el nivel del mar en la región de Limonal, Guanacaste. Con el análisis de estos datos, se obtuvo un  $I_F$  promedio mayor a 1, lo cual comprueba la hipótesis planteada desde el comienzo de que los árboles a una mayor altura reciben una mayor fuerza por el viento.

Esto a su vez, con base en la revisión bibliográfica, demuestra que los árboles a mayor altura están expuestos a un mayor estrés primario, lo que aumentará la posibilidad de que ocurran deformaciones en los árboles. Por lo tanto, esta susceptibilidad puede aumentar la viabilidad de que las infecciones causadas por patógenos ingresen a los individuos.

Finalmente, se cumple con el objetivo de validar la factibilidad de la hipótesis acerca de la predisposición de los árboles a las infecciones fitosanitarias debido al daño mecánico causado por factores externos, en este caso el viento. No obstante, se tienen limitaciones como no medir directamente el daño mecánico encontrado en los árboles que permiten afirmar en su totalidad esta hipótesis.

Debido a que esto representa una amenaza para los cultivos comerciales y de reforestación, se plantean estrategias de mitigación. Se propone el uso de rompevientos, que reduzcan la

velocidad de los vientos que pasan por los cultivos y reduzcan la fuerza del viento provocada por los cultivos. Este análisis abre las puertas para nuevas investigaciones acerca de la incidencia de factores mecánicos ambientales en las plantaciones de teca que pueden redundar en beneficios económicos y ecológicos para la región.

#### AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Se agradece al Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), por permitir y apoyar estos proyectos a nivel estudiantil.

Al Laboratorio de Investigación en Energía Eólica (LIENE) y todos sus miembros, por el apoyo logístico en la instalación y toma de datos de los anemómetros utilizados en este estudio.

A la escuela de Ingeniería Forestal, especialmente a la M. Sc. María Rodríguez, por dar a conocer la problemática actual con los árboles de teca en la plantación de Limonal, de la cual nació la incertidumbre que dio origen a esta investigación.

Al señor Francisco Sage, dueño de la finca en la cual se colocaron los anemómetros, por darnos acceso a esta y garantizar el correcto funcionamiento del equipo de medición durante la toma de datos.

A los operarios de la finca encargados de colocar los anemómetros, por su labor en condiciones de trabajo de altura.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE), del ITCR, por el financiamiento al proyecto de investigación titulado: “Identificación y manejo integrado de las principales plagas forestales presentes en sistemas productivos forestales de Costa Rica”, código 1401134. Debido a que de dicho proyecto se deriva esta investigación.

#### REFERENCIAS

- [1] D. Cibrián Tovar, O. A. Pérez Vera, S. E. García Díaz, R. Medel Ortiz y J. Cibrián Tovar, «Kretzschmaria zonata (Lév.) P.M.D. Martin, causante de la pudrición del cuello y la raíz de teca,» *División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo (UACH), México*, vol. 5, n° 25, 2014.
- [2] J. Blanco Flórez, P. F. Trugilho, J. Lima, P. R. Hein y J. R. Moreira da Silva, «Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L. f. plantada en Brasil,» Scielo, 2014.
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «Encuesta Nacional Agropecuaria 2023,» San José, 2023.
- [4] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «VI censo nacional agropecuario: Cultivo agrícolas, forestales y ornamentales,» INEC, San Jose, Costa Rica, 2015.
- [5] M. Rodríguez-Solís, D. Méndez-Álvarez y A. Berrocal-Jiménez, «Primer reporte *Kretzschmaria zonata* (Lév.) P.M.D. Martin causando pudrición de la raíz en *Tectona grandis* L. en Costa Rica,» Colombia Forestal-Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Colombia, 2024.
- [6] R. Alfenas, M. L. Arenhart, F. Alexandre y G. Maitan-Alfenas, «Root Collar Rot, a New Lethal Disease on *Tectona grandis* Caused by *Kretzschmaria zonata* in Brazil,» APS Journals, 2021.
- [7] C. A. T. d. I. y. E. (CATIE), «Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades,» Turrialba, 2013.
- [8] D.-A. García-García, G.-E. García-Mosqueda y J. Jiménez-Pérez, «Carbono y dióxido de carbono almacenado en una plantación de *Tectona grandis* de 4 y 5 años de edad en México,» 2019.
- [9] M. Arguedas, «Diagnóstico de plagas y enfermedades forestales en costa rica,» Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, 2008.
- [10] M. Rodriguez, Interviewee, *Conocimiento acerca del hongo Kretzschmaria zonata*. [Entrevista]. 19 Febrero 2025.
- [11] F. Telewski, «Wind-induced physiological and developmental responses in trees,» *Wind and Trees*, pp. 237-263, 2009.
- [12] C. H. Bock, J. H. Graham, T. R. Gottwald, A. Z. Cook y P. Parker, «Wind speed and wind-associated leaf injury affect severity of citrus canker on Swingle citrumelo,» *European Journal of Plant Pathology*, vol. 128, n° 1, pp. 21-38, 2010.
- [13] Davis Instruments, «Vantage Pro2 Anemometer 6410 Specification Sheet,» [En línea]. Available: [www.davisnet.com](http://www.davisnet.com). [Último acceso: 01 Enero 2025].
- [14] G. Richmond y G. Murillo, «Características del recurso eólico en Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, 2019.
- [15] Davis Instruments, «Envoy8X data logger, Model 6318,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.davis-europe.nl/product/davis-6318-envoy8x/>. [Último acceso: 01 Enero 2025].
- [16] Y. Cengel y J. Cimbala, *Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones*, Mc. Grawhill, 2012.
- [17] J. Grace, «Plant response to wind,» *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 22/23, pp. 71-88, 1988.
- [18] J. Brandle, L. Hodges, J. Tyndall y R. Sudmeyer, «Windbreak practices,» *North American Agroforestry: An Integrated Science and Practice*, pp. 75-89, 2009.
- [19] B. R. Macias Ortega, *Efecto de las sustancias alelopáticas que causan las plantaciones de teca (Tectona grandis) en el crecimiento de algunas especies vegetales*, Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Carrera de Ingeniería Agropecuaria, 2022.
- [20] J. Stape, C. R. Silva y D. Binkley, «Spacing and geometric layout effects on the productivity of clonal Eucalyptus plantations,» *Trees, Forests and People*, vol. 8, pp. 100-235, 2022.
- [21] Y. Cengel y J. Cimbala, *Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones*, Mexico: McGraw-Hill, 2012.