



# Desarrollo de un macromodelo de predicción del daño por viento en plantas juveniles de *Pinus radiata*

## D. Don

**Patricio Cendoya Hernández** †, **Fernando Muñoz Sáez** ‡, **Peter Dechent Anglada** †, **Mario Giuliano Morbelli** †

† Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Correo 3, Concepción, Chile. Teléfono: ++56 41 203600, Fax: ++56 41 252524, E-mail: pcondoya@udec.cl

‡ Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Casilla 154-C, Correo 3, Concepción, Chile. Teléfono: ++56 41 204906, Fax: ++56 41 246004, E-mail: fmunoz@udec.cl

### RESUMEN

El derribamiento de árboles jóvenes debido a la acción del viento, es un fenómeno que ocurre regularmente en las plantaciones forestales de pino radiata. Consigo trae severos problemas de carácter económico, puesto que la madera se ve afectada fuertemente en su calidad y rendimiento. La magnitud del problema se ve incrementado aún más si se considera que en ocasiones la extensión del siniestro supera el 90% de la plantación. Surge la necesidad de estudiar el fenómeno tanto del punto de vista silvícola como mecánico, para comprender el comportamiento del mismo y buscar la forma en que se puedan aminorar los daños. El presente artículo resume diversas investigaciones realizadas en este campo y en particular se centra en presentar el desarrollo de un macromodelo que considera la contribución del sistema radicular (rigidez, distribución, resistencia de las raíces, ..., etc), cuando el árbol se encuentra sometido a la acción de una ráfaga de viento. En paralelo se entregan antecedentes, para comprender la dinámica del volcamiento y las principales fuerzas que ocurren en el árbol

y sobre el sistema radicular. Finalmente el macromodelo propuesto se somete a pruebas numéricas considerando la influencia de los diversos parámetros que lo caracterizan, en donde se demuestra la naturaleza oscilatoria de los movimientos y se entregan conclusiones preliminares sobre la influencia del sistema radicular en la incidencia del daño por viento.

### INTRODUCCIÓN

El viento es una de las perturbaciones abióticas más comunes en los bosques. Los vientos de altas velocidades que se producen durante temporales pueden provocar caídas, desarraigamiento y quiebre de fustes, además de malformaciones y retardo del crecimiento, pudiendo afectar desde algunos individuos dentro de un rodal hasta grupos de árboles a lo largo de extensas áreas. Cuando esto último ocurre, las pérdidas pueden ser de gran magnitud (Valinger y Fridman, 1997; Gardiner y Quine, 1994; Watson, 2000), como el caso de Nueva Zelanda y Gran Bretaña, donde la mayor causa de pérdidas económicas en plantaciones forestales es ocasionada por el viento (Moore y Quine, 2000), ver figura 1.



**Figura 1.** Efecto del viento en plantaciones juveniles de *Pinus radiata* D. Don.

El reconocimiento de su importancia y complejidad ha ido incorporando recientemente a investigadores de otras disciplinas tales como físicos, aerodinámicos, forestales, ingenieros, fisiólogos, ecólogos, patólogos y expertos en modelación numérica (Coutts y Grace, 1995), permitiendo con esta integración de disciplinas comprender mejor el principal proceso involucrado.

Tanto plantaciones jóvenes como rodales adultos pueden ser afectados por este agente abiótico. En Nueva Zelanda la forma predominante de daño inducido por el viento es la inclinación de árboles juveniles (1-8 años) conocida como derribo (toppling). Este fenómeno se registra desde 1914, y hasta la fecha han ocurrido tormentas y daños regularmente (Mason, 1985). Esta temprana inestabilidad, fue definida por Lines (1980 citado por Muñoz 2000) como la inclinación inducida por el viento, posterior a ello Mason (1985) propuso una definición más empírica, describiendo que un árbol volcado es aquel que ha adquirido una inclinación mayor a  $15^\circ$  desde la vertical. Este autor definió este valor ya que en el caso de árboles jóvenes de pino radiata, inclinaciones mayores permanentes es probable que resulten con algún grado de distorsión en el fuste en la madurez. Estudios de frecuencia de derribo desarrollados en Nueva Zelanda (FRI, 1987), indican que el 20% de los árboles presentaron durante sus primeros cinco años de edad una inclinación de más de  $15^\circ$  con respecto a la vertical. Posteriormente muchos de ellos recobraron la verticalidad, pero desarrollando un tronco sinuoso con un impacto económico severo en el valor de la cosecha, ver figura 2.

Coutts (Coutts, 1986; 1995; 1999) define cuatro componentes dentro del sistema raíz-suelo que en conjunto otorgan estabilidad: (1) resistencia de las raíces y del suelo en el lado de sotavento del árbol; (2) tensión de rotura de las raíces en la zona de barlovento; (3) peso de las raíces y del suelo adherido a ellas; (4) la resistencia del suelo a romperse en los límites del plato radicular.



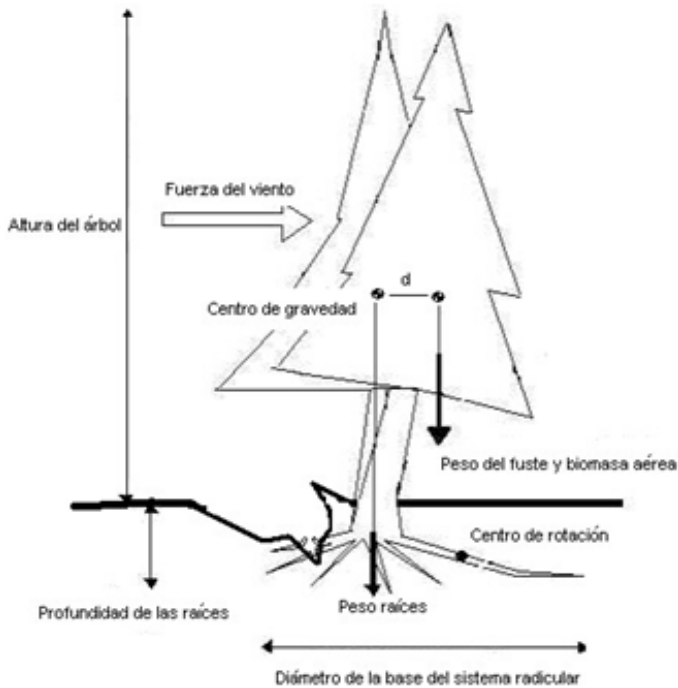
**Figura 2.** Desarrollo de un tronco sinuoso, debido al efecto del viento a una edad temprana.

Durante una tormenta, las copas de los árboles se balancean hacia adelante y hacia atrás con un movimiento elíptico (Gardiner, 1994). Este movimiento, puede debilitar algunas zonas del fuste o del sistema radicular debido a la aparición de fuerzas de tensión, compresión y cizalle, predisponiendo a los árboles a sufrir mayores daños en eventos posteriores.

La oscilación del árbol será función de la altura del árbol, la masa de la copa, el dap y la conicidad.

El derribo de un árbol, ocurre cuando el momento volcante causado por el viento excede al momento resistente. El momento volcante tiene dos componentes; la primera debido a la acción de las fuerzas de arrastre sobre la copa y la segunda se desarrolla a medida que el árbol es doblado por el viento desplazando el centro de gravedad, ver figura 3. Esta segunda componente es relativamente débil en comparación con la componente debida a la fuerza del viento sobre la copa, sin embargo, a medida que el árbol se va flectando y alejándose más de su eje principal, esta fuerza va adquiriendo una mayor proporción en la fuerza horizontal total (Cendoya y Muñoz, 2002).

Por otro lado existen dos fuerzas estabilizadoras que contrarrestan la acción de derribo del árbol. La principal es el anclaje radicular y la otra, la fuerza de resistencia que otorga el contacto entre copas de árboles vecinos. (Coutts, 1986).

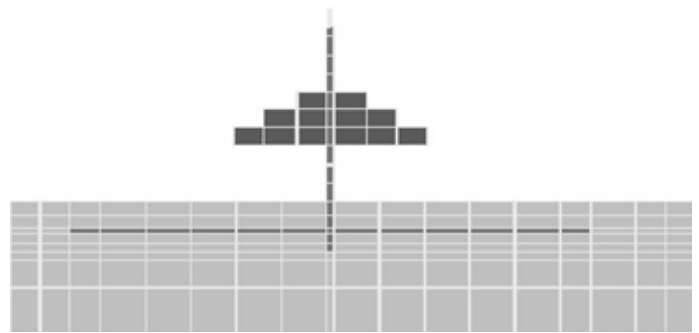


**Figura 3.** Descripción de las fuerzas que actúan en la estabilidad lateral del sistema árbol-suelo-raíces (Cendoya y Muñoz, 2002)

El sistema radicular forma una base rígida de soporte, cuando las raíces están pobremente desarrolladas o inexistentes en alguno de sus lados, la estabilidad queda comprometida (Coutts et al., 1999).

Por tal razón es importante considerar los tipos de formas y simetrías que desarrollan las raíces, como también que fenómenos externos influyen en la generación de ellas. Uno de estos factores que puede influir es la limitación de la profundidad del sistema radicular. Esto queda manifestado por Coutts (1983) al afirmar que cuando la profundidad del sistema radicular está limitada por las condiciones de sitio, se generarán simetrías radiales de gran importancia. Observaciones en terreno han demostrado que los sistemas radiculares son a menudo considerablemente asimétricos. Incluso en donde no existen obstrucciones físicas, y el sitio es relativamente llano, los sistemas radiculares tienen generalmente desarrollos considerablemente desiguales (Coutts et al., 1999; Muñoz, 2000).

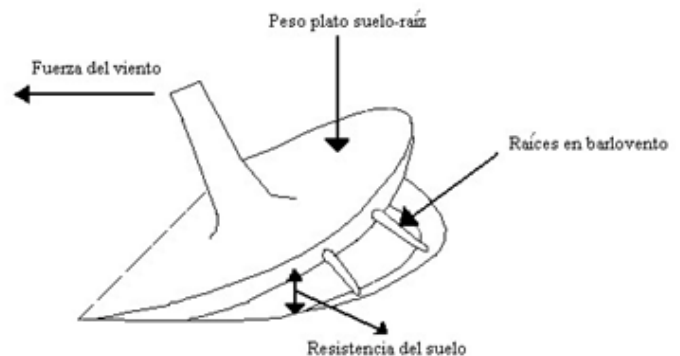
El problema de estabilidad de árboles ha sido estudiado a través de la realización de ensayos en túneles de viento, pruebas de carga in situ (Coutts y Grace, 1995) y el desarrollo de modelos matemáticos mediante elementos finitos (Cendoya y Muñoz, 2002), ver figura 4. Todos estos procedimientos, buscan a priori identificar las variables mecánicas más relevantes que inciden en la inclinación de la planta y en su eventual caída, para posteriormente relacionar estos resultados con las características biológicas y las prácticas silvícolas utilizadas en su formación.



**Figura 4.** Malla de elementos finitos utilizada en la simulación numérica de la mecánica del movimiento de árboles jóvenes de *Pinus radiata* D. Don (Cendoya y Muñoz, 2002)

Según Coutts (1983), la forma en que el sistema de anclaje resiste al momento volcante se relaciona con las siguientes cuatro componentes, ver figura 5:

1. La Resistencia al volcamiento del suelo ubicada debajo y a los lados del plato (tensión y corte del suelo).
2. El peso del plato suelo-raíz.
3. La Resistencia de las raíces en sotavento al doblamiento.
4. La Resistencia a la tracción de las raíces en barlovento



**Figura 5.** Plato suelo-raíz (Coutts, 1983).

De las cuatro componentes, se reconoce que la componente más importante para resistir el volcamiento es la resistencia a la tracción de las raíces ubicadas en el lado de barlovento. Los otros factores contribuyen en la siguiente secuencia: peso del plato suelo-raíz, oposición al doblamiento de "bisagra" de las raíces de sotavento y resistencia del suelo ubicado debajo y a los bordes del plato suelo raíz (Coutts, 1983). Se desprende que la estabilidad del sistema radica en las características geométricas (distribución, forma, tamaño) y mecánicas (resistencia a la tracción de las raíces y resistencia del suelo) del plato suelo-raíz.

Considerando todos los factores anteriormente expuestos, el presente artículo propone un macromodelo que considera la contribución resistente del plato suelo-raíz en la estabilidad lateral de la planta. Para ello se incorporan elementos mecánicos simples que caracterizan al plato suelo-raíz y la biomasa aérea, se plantean

las ecuaciones de equilibrio dinámico y se resuelven para una carga de viento, de variación, intensidad y duración conocida actuando sobre una planta aislada. Los resultados del modelo, permiten conocer la inclinación con respecto al eje vertical que experimenta la planta y analizar la secuencia de falla del plato suelo-raíz que desencadena la caída de la planta.

**MATERIAL Y METODOS**

Hipótesis del modelo biomecánico de predicción de daño por viento. Antes de desarrollar el macromodelo se definió una serie de hipótesis en los que se basó el presente trabajo, las cuales son:

- a. Que el modelo que caracteriza el comportamiento mecánico de la planta puede ser construido a partir de la combinación de un conjunto de barras horizontales distribuidas aleatoriamente que representan a las raíces superficiales, de una barra vertical que representa al fuste, una masa  $m$  que concentra la masa del follaje-fuste y un apoyo fijo que representa el efecto de la raíz pivotante, ver figura 6.
- b. Que el comportamiento mecánico global del modelo, puede ser asimilado al de un cuerpo rígido (England et al., 2000). Por ende, el movimiento de cualquier punto del modelo, puede ser descrito por los desplazamientos  $u$  y  $v$  de la masa concentrada en las direcciones  $X$  e  $Y$  respectivamente.
- c. Que la planta se encuentra aislada y sometida a la acción de una carga de viento de intensidad y duración conocida, actuando a una altura  $L$ , con respecto a la base ver figura 7.

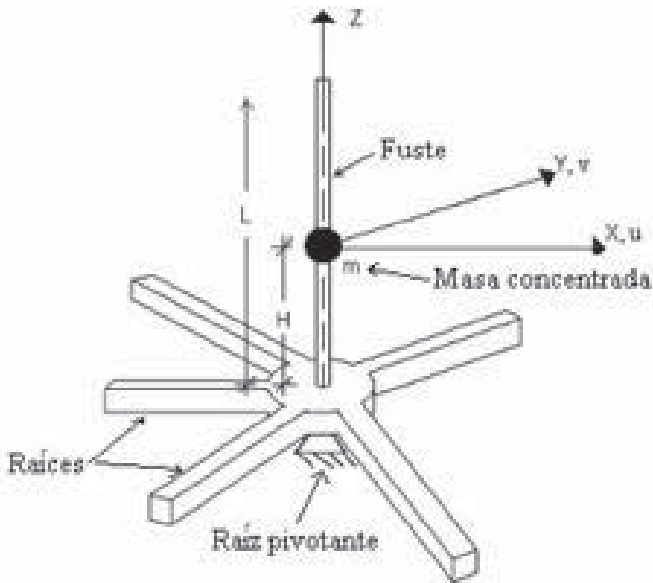


Figura 6. Caracterización del macromodelo

d. Que la interacción del conjunto plato suelo-raíz con el suelo que lo rodea se puede representar a través por un conjunto de resortes ( $k_1, k_2, \dots$ , etc) ubicados a lo largo de las respectivas raíces, tal como se muestra en la figura 7.

e. Que cada uno de los resortes que modelan la interacción del plato suelo-raíz, tienen una relación constitutiva del tipo bilineal, ver figura 8. En donde los valores que acotan el comportamiento ( $F_t, F_c, \delta_1, \delta_2, \delta_0$ ), se definen de acuerdo con información experimental de campo.

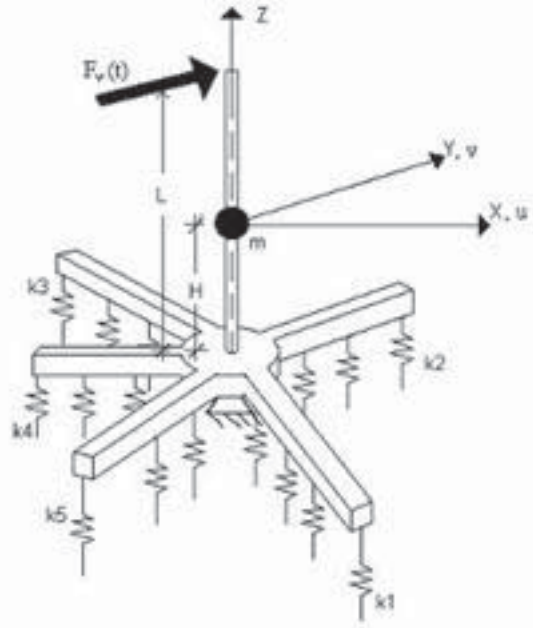


Figura 7. Representación del macromodelo en conjunto con la carga de viento.

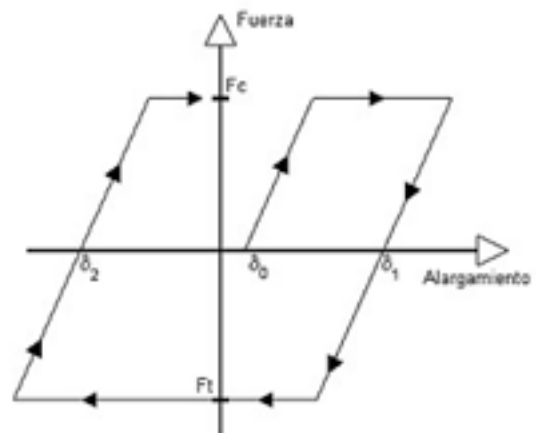


Figura 8. Diagrama fuerza-alargamiento que caracteriza el comportamiento constitutivo del plato suelo-raíz.

f. Que cuando alguno de los resortes ubicados en el lado de barlovento alcanza la máxima fuerza de tracción  $F_t$ , este únicamente desarrolla alargamientos. Esta hipótesis es equivalente a asumir que cada vez que un resorte alcanza la





fuerza máxima de tracción  $F_t$ , la raíz asociada a ese resorte deja de colaborar en el anclaje de la planta.

**Formulación matemática.** Durante una tormenta, la biomasa aérea se balancea hacia adelante y hacia atrás con un movimiento elíptico (Gardiner, 1995). Este movimiento, genera fuerzas de tracción, compresión y corte que pueden debilitar algunas zonas del fuste o del plato suelo-raíz.

La oscilación que experimenta la planta será función de la intensidad y duración del viento, su altura, la masa de la copa, el dap, tamaño y distribución del sistema radicular. Sobre la biomasa aérea debido a la acción del viento se desarrollan fuerzas que tienden a volcar a la planta (momentos volcantes), dichas fuerzas de intensidad y sentido variable generan sobre el plato suelo-raíz fuerzas de compresión y de tracción que afectan la capacidad resistente de este sistema de anclaje. Por otra parte, el peso del plato suelo-raíz y de la biomasa aérea generan fuerzas internas (momentos resistentes) que contrarrestan los efectos desestabilizadores de la acción del viento. Si se denota por  $M_v$  al momento volcante, y por  $M_r$  al momento resistente, la ecuación de movimiento que gobierna el comportamiento de la planta, se define por :

$$M_v(\theta) - M_r(\theta) = I_o \cdot \ddot{\theta} (t) \quad (1)$$

En donde  $I_o$  es el momento de inercia de la planta alrededor de su base y  $\theta$  es el ángulo de inclinación del árbol con respecto a la vertical.

**Momento resistente.** Para determinar la contribución del momento resistente  $M_r$  en la estabilidad de la planta, es necesario caracterizar las fuerzas que participan de este mecanismo:

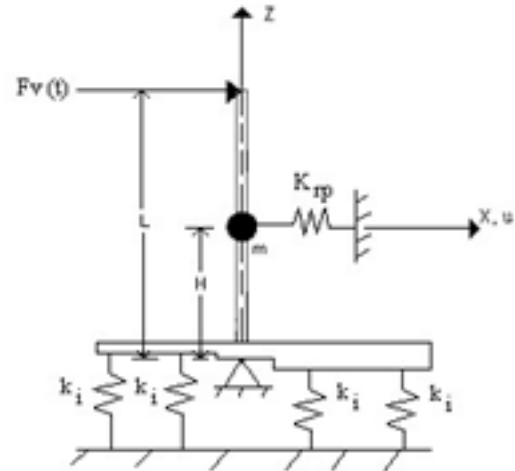
- Fuerzas resistentes aportadas por el plato suelo-raíz. En el modelo se caracterizan por resortes de rigidez  $k_i$  con comportamiento bilineal.
- Fuerzas resistentes debido al efecto de la raíz pivotante. Este efecto, se caracteriza en el modelo a través de la introducción de un resorte elástico lineal de rigidez  $k_{rp}$ , ver figura 9.
- Fuerzas de amortiguamiento viscoso, debidas al efecto de perdida de energía por roce del follaje con el aire, de la rotura de las raíces y de las características mecánicas internas de la madera. Se caracterizan en el modelo, por la introducción de una fuerza proporcional a la velocidad de la masa  $m$  multiplicada por una constante de amortiguamiento viscoso.

**Momento volcante.** En la generación del momento volcante  $M_v$  a intervienen dos fuerzas:

- Fuerza debido a la acción del viento  $FV(t)$ , la cual depende de las condiciones meteorológicas y de la topografía del sitio de la plantación.

- Fuerza de gravedad de la biomasa aérea, la que al desplazarse lateralmente genera un momento volcante adicional.

Definidas y caracterizadas mecánicamente las fuerzas involucradas en el movimiento del sistema, se procede a evaluar los momentos resistentes y volcantes, para luego plantear la ecuación (1). Ecuación que al resolverla en el dominio del tiempo, mediante el método de las diferencias finitas centrales permite conocer la historia del movimiento de la planta durante un evento tormentoso.

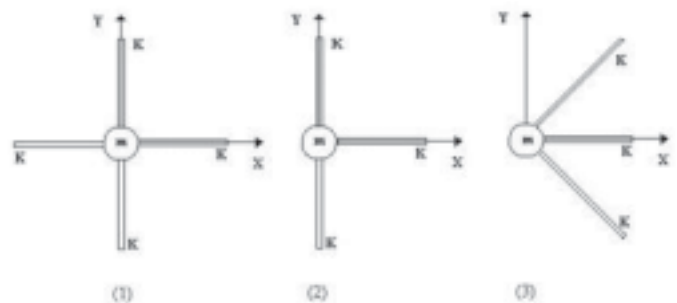


**Figura 9.** Modelo mecánico para considerar el efecto de la raíz pivotante

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este punto se presenta la aplicación del modelo desarrollado, incluyendo la descripción del problema resuelto y los resultados obtenidos.

**Descripción del problema.** El problema a resolver consiste, en el estudio de la estabilidad lateral de una planta juvenil de 50 kg de masa. Dicha planta, puede adoptar como sistema radicular cualquiera de las tres configuraciones mostradas en la figura 10.



**Figura 10.** Configuraciones radicales. (1) modelo simétrico con cuatro raíces, (2) modelo con tres raíces y (3) modelo de tres raíces antisimétricas con respecto al eje horizontal.

Cada una de las raíces que conforman los respectivos sistemas radiculares en las configuraciones (1), (2) y (3) tienen igual longitud y rigidez. En las tablas 1, 2, 3 y 4 se resumen las principales variables consideradas en los modelos.

VARIABLE	VALOR
m	(50)
H	1 (m)
$\lambda$	4.2 (1/s)
k <sub>rp</sub>	500 (N/m)

**Tabla 1.** Propiedades másicas y geométricas consideradas.

RESORTE	K (N/m)	ORIENTACIÓN	F <sub>c</sub> (N)	F <sub>t</sub> (N)
1	1500	0	57.00	-105.00
2	1500	90	57.00	-105.00
3	1500	180	57.00	-105.00
4	1500	270	57.00	-105.00

**Tabla 2.** Configuración radicular (1)

RESORTE	K (N/m)	ORIENTACIÓN	F <sub>c</sub> (N)	F <sub>t</sub> (N)
1	1500	0	57.00	-105.00
2	1500	90	57.00	-105.00
3	1500	270	57.00	-105.00

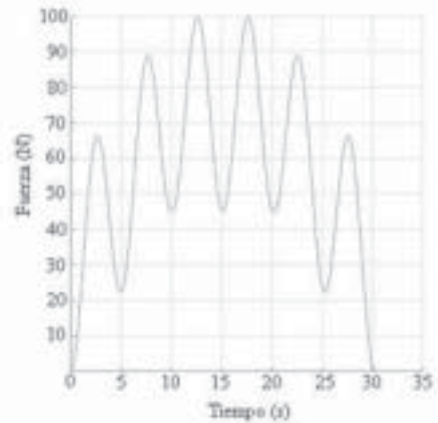
**Tabla 3.** Configuración radicular (2)

RESORTE	K (N/m)	ORIENTACIÓN	F <sub>c</sub> (N)	F <sub>t</sub> (N)
1	1500	0	57.00	-105.00
2	1500	45	57.00	-105.00
3	1500	315	57.00	-105.00

**Tabla 4.** Configuración radicular (3)

Conocidas las propiedades geométricas, mecánicas de cada planta y de su respectivo sistema radicular, se debe caracterizar la fuerza del viento. Esta se supondrá aplicada actuando a 1.5 m de altura, con una amplitud máxima de 100 N, frecuencia de excitación de 1.25 rad/s y actuando durante un tiempo de 30 seg., ver figura 11.

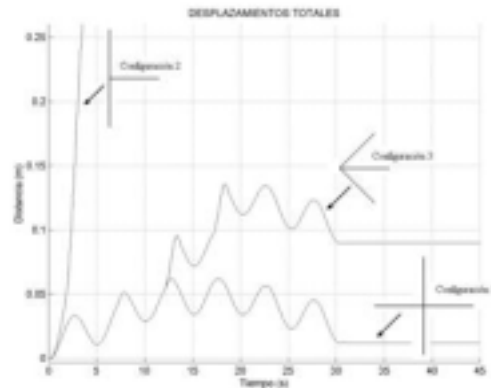
El presente análisis considera que la máxima inclinación con respecto a la vertical que puede experimentar la planta es de quince grados. Ángulos de inclinación mayores generan la condición de caída inminente y la posterior intervención de la planta para restituir su verticalidad o el desarrollo de un tronco sinuoso (Mason, 1985).



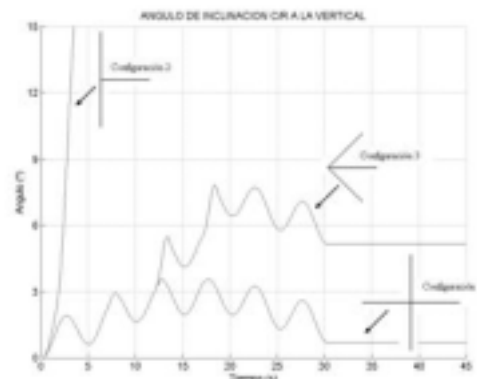
**Figura 11.** Fuerza del viento según la dirección del eje X. Caracterización dinámica.

A continuación se presentan los desplazamientos totales del centro de masa y el ángulo de inclinación del fuste con respecto a la vertical para tres orientaciones diferentes de la carga de viento  $F_v(t)$ . Las condiciones iniciales tanto de desplazamientos, velocidades y aceleraciones se asumen nulas.

Caso 1: Fuerza aplicada en forma paralela al eje a X:



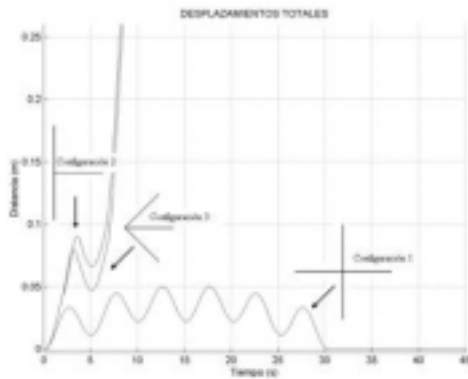
**Figura 12.** Variación de los desplazamientos totales del centro de masa.



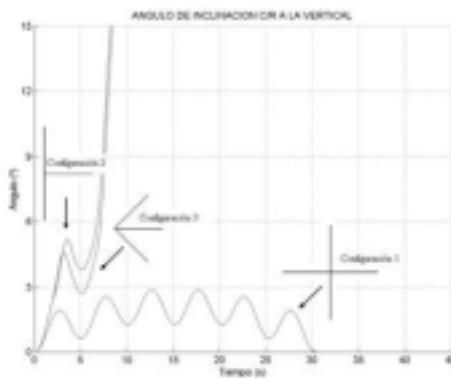
**Figura 13.** Variación del ángulo de inclinación del fuste con respecto al eje vertical Z.



Caso 2: Fuerza aplicada a 450 con respecto a eje al X, en sentido antihorario sobre el plano XY:

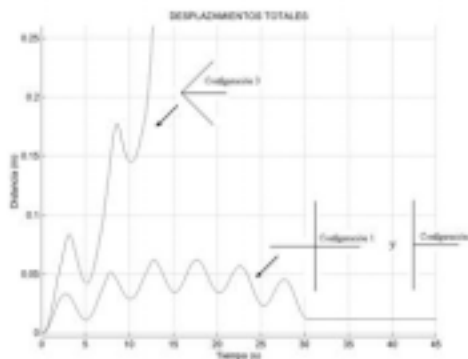


**Figura 14.** Variación de los desplazamientos totales del centro de masa.

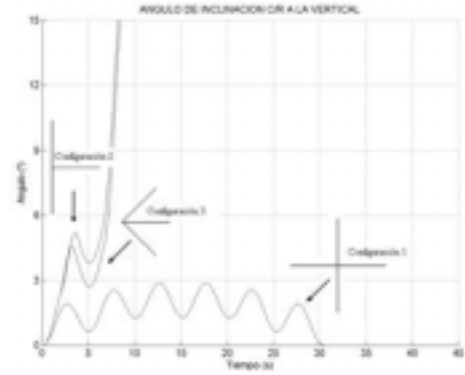


**Figura 15.** Variación del ángulo de inclinación del fuste con respecto al eje vertical Z.

Caso 3: Fuerza aplicada a 90° con respecto a eje al X, en sentido antihorario sobre el plano XY:



**Figura 16.** Variación de los desplazamientos totales del centro de masa.



**Figura 17.** Variación del ángulo de inclinación del fuste con respecto al eje vertical Z.

Las figuras 13, 15 y 17 permite apreciar la variación en el tiempo del ángulo de inclinación  $\theta$  medido con respecto a la vertical. Se observa que las configuraciones 2 y 3 son las mas inestables, pues rápidamente se alcanzan los valores limites recomendados en la literatura para  $\theta_{max}$  que inhabilitan y desencadenan el proceso de volcamiento inminente del árbol. En la configuración 1, tanto para fuerza paralela al eje X, como perpendicular el árbol, el centro de masas oscila en torno a la vertical volviendo a su posición inicial después de terminada la excitación.

### CONCLUSIONES

Para poder establecer a priori la magnitud del daño en plantaciones forestales ocasionadas por el viento, es necesario conocer tanto las características generales de la planta y del terreno como también el mecanismo de interacción dinámica que ocurre en el sistema plato suelo-raíz. Al estudiar en literatura pertinente al tema central de la presente investigación, se logró identificar que las componentes más importantes para resistir el volcamiento se encontraban en el sistema radicular, a través de la resistencia de las raíces traccionadas en el lado de barlovento, la oposición al doblamiento de las raíces a sotavento, la rigidez de la raíz pivotante y el peso del plato suelo-raíz. Sin embargo, en una planta la distribución de las raíces y su morfología no puede determinarse adecuadamente, producto de las diversas asimetrías, tamaños y formas que habitualmente se encuentran en terreno. Todo lo anterior se puede reafirmar a través de las observaciones en terreno, en las cuales árboles estables y los derribados se han encontrado creciendo en la misma zona y poseyendo además características comunes de tamaño y follaje sobre el suelo, por lo que se puede intuir que la real diferencia entre estos árboles se encuentre bajo el suelo, en las raíces. Otro aspecto que dificulta la caracterización del sistema radicular, es el hecho de que el árbol al ser un ser viviente, puede adaptarse ante los agentes externos, modificando algunas características de su sistema radicular, principalmente las formas y tamaños de la sección transversal para fortalecer su rigidez.



En base a estos antecedentes, se construyó un modelo mecánico del comportamiento del árbol, principalmente enfocado a la modelación mecánica de su sistema radicular. Modelo en el cual se considera la intervención adecuada tanto de las fuerzas volcantes como de aquellas que buscan la estabilidad de la estructura.

Los resultados numéricos indican la similitud encontrada con los movimientos reales observados en terreno, movimientos de naturaleza oscilatoria que al finalizar la acción del viento muchas veces no logran recobrar la verticalidad inicial. La problemática del fenómeno en estudio, en base a las diferentes características que poseen los árboles, motivó a realizar variaciones en muchos de los parámetros del modelo (análisis de la sensibilidad), para identificar la importancia de estos en la estabilidad global del sistema (Esparza, 2002) Los resultados numéricos fueron calibrados de acuerdo con antecedentes proveídos en la literatura y observaciones obtenidas en terreno.

Finalmente se debe establecer la gran importancia de contar con una distribución adecuada del sistema radicular superficial, buscando del desarrollo de sistemas radiculares simétricos y la presencia de una raíz pivotante. Este estudio demuestra la importancia de realizar prácticas silvícolas correctas para permitir que los árboles puedan desarrollar sistemas radiculares apropiados para poder soportar la acción volcante del viento y evitar todos aquellos perjuicios que se producen en las empresas forestales del país.

### BIBLIOGRAFÍA

- Cendoya, P., Muñoz, F. (2002). Modelamiento del efecto del viento sobre árboles jóvenes de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque* (23), N° 2:51-56.
- Coutts M. P. (1983). Root architecture and tree stability. *Plant and Soil* 71.
- Coutts M. P. (1986). Components of tree stability in Sitka spruce on peaty, gley soil. *Forestry* 59.
- Coutts M. P. and Grace J. (1995). *Wind and Trees*. Cambridge University Press.
- Coutts M. P., Nielsen C. C. N. y Nicoll B. C. (1999). The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant and Soil* 217.
- England A. H., Baker C. J. and Saunderson S. E. T. (2000). A dynamic analysis of windthrow of trees. *Forestry*, Vol. 73.
- Esparza, J.C. (2002). Análisis de la interacción suelo-raíces en plantas juveniles de *Pino radiata* D. Don. Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.
- FRI. (1987). What's New in Forest Research. N° 147. Forest Research Institute. Rotorua, New Zealand.
- Mason E, G (1985). Cause of juvenile instability of *Pinus radiata* in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 15(3).
- Moore, J., Quine, C.P., (2000). A comparison of the relative risk of the wind damage between planted forest in Border Forest Park, Great Britain and Central North Island, New Zealand. *Forest Ecology and Management* 135, 345-343.
- Gardiner, B. A. & Quine, C.P. (1994). *Wind Damage to forests*. Biomimetics, Vol. 2.
- Gardiner, B. A. & Quine, C.P. (2000). Management of forest to reduce the risk of abiotic damage- a review particular reference to the effects of strong winds. *Forest Ecology and Management* 135, 261-277.
- Muñoz, F. (2000). Efectos de la preparación de suelo y técnica de propagación de planta en la morfología del sistema radicular de *Pinus radiata* D. Don establecido en suelos arenosos. Tesis de grado Magister en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- Valinger, E., Fridman, J., (1997). Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics. *Forest Ecology and Management* 97, 215-222.
- Watson, A. (2000). Wind-induced forces in the near-surface lateral roots of *radiata* pine. *Forest Ecology and Management* 135, 133-142.