

MODELAMIENTO DE LA PROBABILIDAD DE DAÑO POR VIENTO EN PINUS RADIATA EN CHILE: UNA APLICACIÓN DE MODELOS LOGIT

Navarrete Eduardo¹, Romero Alejandro², Quila Carolina³

Resumen. Con el objetivo de identificar los factores que inciden en la caída de plantas a causa del viento y de estimar su probabilidad de ocurrencia, se estudiaron plantaciones de *Pinus radiata* de dos años de edad en la zona centro-sur de Chile (35°20' S; 71°50' W y 40°07' S; 72°53' W). Un modelo de regresión logística fue desarrollado usando características dendrométricas y edáficas, basándose en información de plantaciones establecidas en diferentes tipos de suelo y preparación de sitio. Se extrajeron un total de 60 plantas (parejas) inclinados y no inclinados por el viento, los cuales debían presentar una separación menor a 10 metros entre ellos, y una inclinación vertical superior a los 15°, a los cuales se les realizaron mediciones individuales a nivel aéreo y radicular. La variable que explicó mayormente la probabilidad de caída de los árboles fue el diámetro promedio de las raíces laterales en el cuadrante de barlovento, determinándose que a medida que aumentaba el diámetro de este tipo de raíces, la probabilidad de caída de los árboles también se incrementaba. Los resultados muestran que es posible predecir el daño por viento en un sitio determinado, usando sólo características a nivel de árbol individual.

Palabras clave: *Pinus radiata*, daño por viento, modelos logit, regresión logística.

1. INTRODUCCIÓN

El viento es uno de los factores de riesgo más importantes en plantaciones forestales a nivel mundial. De hecho, el daño por viento es significativamente mayor que el daño causado por el fuego, el cual es responsable de sólo una pequeña proporción de la pérdida total de plantaciones (Somerville, 1989). Los vientos con velocidades promedio entre 25 a 29 m/s pueden causar daños a los árboles (desarraigamiento, derribamiento, inclinación, etc.) en casi todos los tipos de suelos, dependiendo exclusivamente de la duración del evento. En general, son pocos los árboles que pueden resistir velocidades de viento mayores a 30 m/s (Savill *et al.*, 1997). La magnitud del daño provocado por el viento depende de tres componentes principales: velocidad, duración y periodicidad (Alarcón *et al.*, 1986). El daño producido por el viento ("Toppling"), corresponde a la alteración del sistema estructural, manifestándose en síntomas evidentes como fracturas, a otros menos perceptibles (ocurren gradualmente), como el desplazamiento del centro de gravedad de los árboles producto de su inclinación. Finalmente, todo conlleva a una disminución de la cantidad y calidad de la biomasa que se espera obtener de los árboles (Álvarez *et al.*, 2001). Según Martin y Ogden (2006), los factores que disminuyen la estabilidad de los árboles e influyen en el daño por viento en plantaciones son bióticos (especies,

tamaño y sanidad del árbol) y abióticos (posición topográfica, condiciones edáficas y el historial de los eventos de vientos), los que interactúan entre sí. Habiéndose manifestado que el derribamiento es ocasionado por la acción del viento, es importante señalar que los árboles derribados y los estables son encontrados frecuentemente creciendo en la misma zona (FRI, 1987). Por lo anterior, el suelo es un factor que tiene gran importancia en la resistencia del árbol a las fuerzas ejercidas por el viento. Al actuar como medio de anclaje, el suelo es de vital importancia en la estabilidad del árbol, mientras mayor sea la masa de suelo adherida a las raíces, más firme es el árbol al viento; esta masa depende del volumen y la densidad aparente del suelo (Henríquez, 2004). Según Toro (2004), el uso de la información del suelo y sitio, es vital para preparar las prescripciones que facilitarán la implementación de regiones silvícolas específicas. Esto permite evitar o disminuir los riesgos (sequía o los excesos de agua, la aparición de plagas y enfermedades, los temporales de viento, las temperaturas extremas, etc.) que pueden afectar a las plantaciones. Actualmente es normal encontrar suelos altamente compactados, lo que impide un rápido desarrollo del sistema radicular de las plantas, y evita la mayor retención de humedad para los periodos estivales. Con la aplicación de técnicas de preparación de suelos en la actividad forestal, se persigue un aumento en la fertilidad del suelo y una baja en la competencia de la vegetación invasora, a través de un rápido y homogéneo crecimiento de las superficies regeneradas. El sistema radicular cumple la función de absorción de agua y nutrientes desde el suelo, el transporte de estos a los tallos y hojas; además, la morfología juega un rol fundamental en la estabilidad de los árboles y la resistencia al viento, características que son influenciadas por

¹ Navarrete E. Eduardo. Universidad de Concepción. Unidad Académica Los Ángeles. Departamento Forestal. Grupo de Investigación GESE. Los Ángeles. Chile. (e-mail: ednavarr@udec.cl)

² Romero V. Alejandro. Universidad de Concepción. Unidad Académica Los Ángeles. Departamento Forestal. Los Ángeles. Chile. (e-mail: alejrome@udec.cl)

³ Quila S. Carolina. Universidad de Concepción. Unidad Académica Los Ángeles. Departamento Forestal. Los Ángeles. Chile. (e-mail: cqquila@udec.cl)

las actividades culturales en vivero, donde las plantas son acondicionadas para producir abundantes raíces fibrosas por sobre raíces estructurales, las cuales le permitirán un mejor anclaje, junto a los métodos de plantación (Ponse, 2000).

En Chile, durante la estación de invierno del año 2000, la zona centro sur fue escenario de inusuales temporales, en los cuales se combinaron fuertes vientos e intensas precipitaciones. De varios eventos ocurridos en el mes de Julio de ese año, dos fueron los que afectaron fuertemente a plantaciones forestales de *P. radiata* y *Eucalyptus* de 1 a 3 años de edad, lo que se transformó en una pérdida de alrededor de 40.000 ha de patrimonio pertenecientes a las principales empresas forestales del país (Álvarez *et al.*, 2001).

Debido a lo anterior, es importante identificar las variables edáficas y morfológicas de la planta que inciden en la caída de éstas a causa del viento, pudiendo a su vez, ser utilizadas en la predicción de la probabilidad de dicho evento en el futuro.

El presente estudio tiene como objetivo general determinar la influencia del tipo de suelo, las actividades de preparación de sitio y la morfología de las plantas, en el volcamiento de plantas de *P. radiata* por causa del viento. A su vez, se plantean como objetivos específicos: *i*) Identificar y analizar las características morfológicas de la planta y condiciones de sitio que inciden en la caída de plantas; y *ii*) Determinar si es posible a partir de un modelo logístico, estimar la probabilidad de ocurrencia de caída de plantas, basado en un conjunto de variables predictoras planta-suelo.

2. MATERIALES Y MÉTODO

El estudio se realizó en plantaciones de *P. radiata* de dos años de edad, establecidas en diferentes series de suelo y con distinto tipo de preparación. Los rodales en estudio se encuentran ubicados en la zona centro-sur de Chile, y pertenecen a la empresa Forestal Mininco S.A. (Tabla I).

TABLA I

Modelamiento de la probabilidad de daño por viento en *pinus radiata* en Chile: una aplicación de modelos logit
Descripción de zonas de estudio

Suelo	Región	Ubicación geográfica
Rojos arcillosos	De la Araucanía	38° 22' S; 72° 46' W
Graníticos	Bío Bío	37° 05' S; 72° 41' W
Metamórficos	Bío Bío	36° 56' S; 73° 07' W
Trumaos	De la Araucanía	40° 07' S; 72° 53' W
Aluviales	Maule	35° 20' S; 71° 50' W

De los cinco tipos de suelos considerados en el estudio, se extrajeron un total de 60 plantas, 12 plantas por tipo de suelo, a los cuales se les realizaron mediciones individuales a nivel aéreo y radicular. El estudio consistió en seleccionar plantas de *P. radiata*, inclinadas y no inclinadas por el viento, en sitios con y sin preparación de suelo. Se eligieron tres parejas de plantas en cada una de las condiciones de tipo y preparación de suelo (casilla mecanizada).

Las parejas de plantas fueron seleccionadas de acuerdo a las siguientes condiciones:

- Una planta de la pareja debía presentar algún grado de inclinación por efecto del viento (derribamiento), mientras que la otra planta debía estar completamente recta. Se entendió por una planta derribada (Toppling), aquella que presentó una inclinación con respecto a la vertical, superior a los 15° (Mason, 1985).
- El tipo de suelo y el régimen de establecimiento fueron los mismos para ambos tipos de plantas, los cuales debieron presentar también, dimensiones similares en cuanto a altura y diámetro.

- Las plantas debían presentar una separación menor a 10 metros entre ellas, y estar expuestas a condiciones similares de los vientos prevalecientes. Estas restricciones fueron impuestas para asegurar que las condiciones microclimáticas y de sitio fueran similares.

En cada planta se midieron las variables aéreas: altura total, diámetro altura de pecho (DAP) y diámetro a la altura del cuello (DAC). Posteriormente, se excavaron las raíces de cada planta cuidadosamente a una distancia de 60 centímetros alrededor del eje central, separadas por cuadrante, para luego extraerlas y limpiarlas hasta dejarlas libres de tierra, para proceder a medir las siguientes variables:

- a. Ángulo del toppling en grados y la dirección hacia el cual se inclinó la planta (N, S, E, O), determinado a partir del Toppled meter.
- b. Diámetro de la raíz pivotante, a 10 centímetros de su origen (mm).
- c. Área raíces verticales (cm²).
- d. Ángulo en que se encuentran distribuidas las raíces dentro de cada cuadrante (°).
- e. Profundidad de las primeras raíces, la que se asumirá como la profundidad de la plantación (cm).
- f. Cantidad de raíces verticales con más de 2mm de diámetro a 10 cm de su origen. Se denominaron raíces verticales, a aquellas con un ángulo mayor a 45° con respecto a la horizontal.
- g. Diámetro raíces verticales con más de 2 mm de diámetro a 10 cm de su origen (mm).
- h. Cantidad de raíces laterales por cuadrante.

- i. Diámetro de las raíces laterales con más de 2 mm de diámetro a 10 cm de su origen por cuadrante (mm).
- j. Clasificación de forma de la raíz pivotante y las raíces laterales, mediante la tabla de Menzies.

Modelamiento de la probabilidad de caída de plantas.

Para evaluar la probabilidad de caída de plantas por efecto del viento se utilizó un modelo de regresión con variable dependiente binomial (modelo logístico o modelo de regresión logística), utilizándose como variables predictoras, todas aquellas características, tanto de suelo como de la planta, registradas en terreno.

Un modelo logístico supone la existencia de una variable dependiente "latente", en este caso, la probabilidad de caída de una planta. La respuesta de la variable de interés tiene sólo dos resultados cualitativos posibles, y por eso pueden ser representados por una variable binaria del indicador, cobrando valores 0 para el caso de la no caída de la planta, y 1 para la caída de esta (Neter *et al.*, 1996). En este modelo, el logaritmo de la razón de las probabilidades de los dos posibles resultados es una función lineal de las variables independientes (Maddala, 1988).

Al usar un análisis logístico, la probabilidad (p) para un árbol de ser derribado por efecto del viento, es modelado como una función de características, tanto del suelo, como del árbol (X) (Valinger y Fridman, 1997), y tiene la forma:

$$\text{Logit } p = \ln \frac{p}{1-p} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (1)$$

De esto, la probabilidad de daño (p) puede calcularse como:

$$p = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n)} \quad (2)$$

El modelo logístico permite utilizar diferentes proporciones de muestreo para las dos subpoblaciones de observaciones, su resultado es un valor numérico que indica la probabilidad de pertenencia de la planta al grupo que se le asignó el valor 1; es decir, el grupo de las plantas caídas. Esta estimación se debe realizar por métodos de máxima verosimilitud cuando se analizan observaciones individuales como caído Sí/No. En la confección del modelo logístico se utilizó el software SPSS 15.0, donde a través de la función "stepwise" se discriminaron las variables dendrométicas y edáficas que efectivamente incidieron en la caída de plantas.

Para la estimación del modelo se empleó el método de estimación por máxima verosimilitud, que no establece restricción alguna respecto de las características de las variables predictoras, éstas pueden ser nominales, ordinales o de intervalos. En el procedimiento de máxima verosimilitud, se seleccionan las estimaciones de los parámetros que hacen posible que los resultados observados sean lo más verosímiles posibles. A la probabilidad de los resultados observados, dadas las estimaciones de los parámetros, se le denomina verosimilitud. Como la verosimilitud es un valor pequeño, se utiliza como medida de ajuste del modelo a los datos "2 veces el logaritmo de la verosimilitud" ó $-2LL$. Un buen modelo es aquel que da lugar a una verosimilitud grande, por lo cual el valor de $-2LL$ será pequeño (Alderete, 2006).

Bondad de ajuste del modelo.

Según Alderete (2006), en algunos softwares se presentan dos coeficientes de determinación similares al de un ajuste de un modelo lineal, pero adaptado a los modelos logísticos. Uno de ellos es el estadístico Coeficiente R^2_L de Cox y Snell, que se determina de la siguiente manera:

$$R^2_L = 1 - \left[\frac{-2LL_{(nulo)}}{-2LL_{(modelo)}} \right]^{2/N} \quad (3)$$

Donde: $-2LL$ (nulo) es la desviación del modelo nulo solo o con una constante, sin incorporar las variables predictoras; $-2LL$ (modelo) es la desviación del modelo con las variables predictoras; y N es el tamaño de la muestra. Como el valor máximo de esta medida no alcanza 1, Nagelkerke propuso una modificación que incrementa el coeficiente de Cox y Snell para obtener un valor máximo de 1.

Coeficiente R^2_L de Nagelkerke:

$$\bar{R}^2_L = \frac{1 - \left[\frac{-2LL_{(nulo)}}{-2LL_{(modelo)}} \right]^{2/N}}{1 - (2LL_{(modelo)})^{2/N}} \quad (4)$$

Otra forma de determinar la bondad del ajuste es a través de una tabla de clasificación, donde se consignan las frecuencias en las categorías de la variable dependiente según lo observado y según lo pronosticado en el modelo. Los datos proporcionados permiten también analizar la especificidad y sensibilidad del modelo, además de las tasas de falsos positivos y falsos negativos. En regresión logística, la variable dependiente es dicotómica, por lo cual es de interés predecir la probabilidad de ocurrencia de un evento. El procedimiento de cálculo del coeficiente logístico compara la probabilidad de ocurrencia de un

suceso con la probabilidad de que no ocurra. Los coeficientes β son las medidas de los cambios en la razón de probabilidad denominado "odds ratio". Un valor de 1 en el *odds* quiere decir que existe equiprobabilidad en ambas categorías de la variable. Un valor mayor que 1 indica que esa categoría tiene mayor probabilidad de ocurrencia. Tiene el inconveniente que su valor varía entre 0 y $+\infty$, por lo que pueden ser expresados en logaritmos y deben ser transformados para ser interpretados. Un coeficiente positivo aumenta la probabilidad de ocurrencia, y uno negativo la disminuye. Para el contraste de los coeficientes se utiliza el estadístico W de Wald, que es igual al cuadrado de la razón entre un coeficiente de regresión y su error típico. El estadístico W sigue

una distribución Chi cuadrado, con un grado de libertad, lo que es apropiado para su uso con datos categóricos (Alderete, 2006).

3. RESULTADOS

En la Tabla II se observa la totalidad de variables analizadas para la construcción del modelo de estimación de probabilidad de caída de plantas. Al observar los valores-p, se aprecia que ninguna variable explica en forma significativa la probabilidad de caída de plantas, esto como consecuencia de la interacción que existe entre las variables.

TABLA II
Modelamiento de la probabilidad de daño por viento en pinus radiata en Chile: una aplicación de modelos logit
Variables analizadas para la construcción de modelo en orden de importancia para cada tipo de variable

Variables		Valores-p
Variables del suelo (dicotómicas)	Clase de suelo 1 (Aluvial)	0,051
	Clase de suelo 3 (Granfíticos)	0,299
	Clase de suelo 2 (Metamórficos)	0,515
	Preparación de suelo	0,577
Variables aéreas	Clase de suelo 4 (Trumao)	1,000
	DAP (cm)	0,266
	DAC (cm)	0,315
Variables Radiculares	Altura (cm)	0,441
	Clase de raíz lateral 3 (1)	0,127
	Diámetro promedio raíces verticales (mm) (DPRV)	0,131
	Diámetro raíz pivotante (mm) (DPRP)	0,162
	Diámetro promedio raíces laterales cuadrante 1 (cm) (DPRL_C1)	0,193
	Diámetro promedio raíces laterales cuadrante 2 (cm) (DPRL_C2)	0,203
	Cantidad raíces verticales (CRV)	0,215
	Clase raíz pivotante 3 (1)	0,299
	Clase raíz pivotante (1)	0,299
	Clase raíz lateral 1 (1)	0,299
	Cantidad de raíces cuadrante 1 (CR_C1)	0,388
	Clase raíz pivotante 2 (1)	0,515
	Profundidad primeras raíces (cm) (PPR)	0,521
	Clase raíz pivotante 1 (1)	0,577
	Cantidad de raíces cuadrante 2 (CR_C2)	0,583
	Diámetro promedio raíces laterales cuadrante 4 (cm) (DPRL_C4)	0,734
	Cantidad de raíces cuadrante 3 (CR_C3)	0,759
Índices	Área raíces verticales (cm ²) (ARV)	0,817
	Diámetro promedio raíces laterales cuadrante 3 (cm) (DPRL_C3)	0,864
	Cantidad de raíces cuadrante 4 (CR_C4)	1,000
	DAP / (altura-1,3)	0,175
	h / DAP	0,179
	DAC ² x h	0,280
	DAP ² x h	0,340
h / DAC	0,543	
(DAC - DAP) / 1,3	0,628	

La tabla III detalla el tamaño de la muestra con el cual se realizó el modelamiento, mostrando los casos incluidos y perdidos con sus respectivos porcentajes.

TABLA III
Modelamiento de la probabilidad de daño por viento en pinus radiata en Chile: una aplicación de modelos logit
Resumen del procesamiento de los casos

Casos no ponderados(a)		N	Porcentaje
Casos seleccionados	Incluidos en el análisis	37	66,1
	Casos perdidos	19	33,9
	Total	56	100,0
Casos no seleccionados		0	0,0
Total		56	100,0

La tabla IV muestra las variables seleccionadas para el modelo, sus respectivos estimadores de parámetros (β), error estándar por variable (E.T), el estadístico que permite contrastar la hipótesis nula de no significancia individual de cada una de las variables incluidas en el modelo (Wald), Odds con sus respectivos límites (asociado a un suceso, es el cociente entre la probabilidad de que ocurra frente a la probabilidad de que no ocurra), la significancia de cada estimador y Exp (β), que permite interpretar la cuantía del parámetro estimado, ya que indica el número de veces que es más probable obtener la alternativa 1 frente a la 0 cuando la variable explicativa se incrementa en una unidad.

TABLA IV
Modelamiento de la probabilidad de daño por viento en pinus radiata en Chile: una aplicación de modelos logit
Variables de la ecuación y estimadores de parámetros del modelo

	β	E.T.	Wald	gl	Odd	Odd LI (95%)	Odd LS (95%)	Sig.	Exp(B)
DPRL_C1	0,293	0,122	5,793	1	0,12	0,02	0,77	0,016	1,341
Constante	-2,085	0,926	5,075	1	1,34	1,06	1,70	0,024	0,124

Por último se obtuvo el modelo logístico binario, el que se describe a continuación:

$$P = \frac{\exp(-2,085 + 0,293 \times DPRL_C1)}{1 + \exp(-2,085 + 0,293 \times DPRL_C1)} \quad (5)$$

En la ecuación anterior, se observa que la única variable predictora incluida en el modelo correspondió al diámetro promedio de raíces laterales del cuadrante 1 (DPRL_C1). El modelo indica que un incremento de una unidad en la escala de medida de la variable DPRL_C1, produce un incremento multiplicativo por un factor de 1,341 en la escala de los productos cruzados (Exp (β)) (tabla IV), esta escala varía entre 0 y $+\infty$, y un factor mayor que 1 produce un incremento, y un factor menor que 1 una disminución. Si esto se traduce en términos de porcentaje de cambio, la interpretación es más accuquible, esto es:

$$100 \times (\exp^{\beta_1} - 1) = 100 \times (\exp^{(0,293)} - 1) = 34,04\%$$

Al transformar β_1 en términos de porcentaje de cambio, este permite interpretar la cuantía del parámetro estimado, ya que indica el número de veces que es más probable obtener la alternativa 1 frente a la 0 cuando el diámetro promedio de raíces laterales del cuadrante 1 (DPRL_C1), aumenta en 1 mm.

La tabla V presenta la bondad del ajuste del modelo, donde el -2 log de la verosimilitud permite contrastar modelos logísticos cuando uno de estos presenta una variable extra al modelo en comparación, cuanto menor sea, mayor es la verosimilitud y mejor el ajuste del modelo. El coeficiente de determinación de Nagelkerke para el modelo es 0,275 teniendo en cuenta que el valor máximo es 1, podemos decir que es un coeficiente de mejor interpretación que el de Cox y Snell, e indica que un 27,5% de la varianza es explicada por las variables predictoras incluidas en el modelo.

TABLA V
Modelamiento de la probabilidad de daño por viento en pinus radiata en Chile: una aplicación de modelos logit
Resumen de los parámetros de bondad de ajuste del modelo

-2 log de la verosimilitud	R cuadrado de Cox y Snell	R cuadrado de Nagelkerke
42,733	0,206	0,275

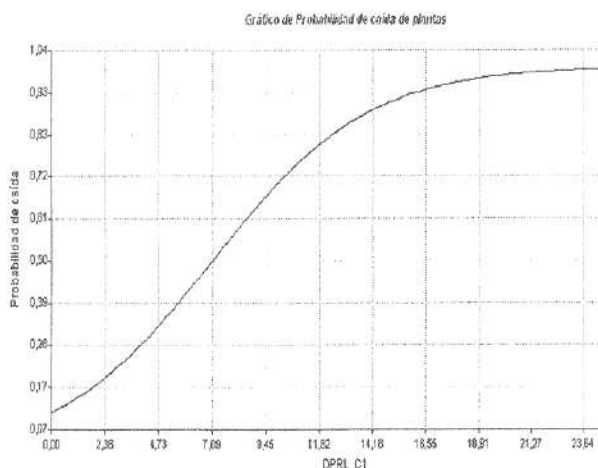
En la tabla VI se observa que el modelo presentó una especificidad de 66,7%, lo cual indica el porcentaje de acierto del pronóstico de plantas no caídas; una sensibilidad de un 68,4%, que corresponde al porcentaje de acierto en el pronóstico de plantas caídas. Para el modelo en general, el porcentaje total promedio de acierto es de un 67,6%. La proporción de falsos negativos y falsos positivos es de un 31,6 % y 33,3 % respectivamente.

TABLA VI
 Modelamiento de la probabilidad de daño por viento en *pinus radiata*
 en Chile: una aplicación de modelos logit
 Tabla de clasificación de la caída de plantas

Observado	TOPPLED	Pronosticado TOPPLED		Porcentaje correcto
		0 (No caído)	1 (Caído)	
TOPPLED	0 (No caído)	12	6	66,7
	1 (Caído)	6	13	68,4
Porcentaje global				67,6

En la figura 1 se observa el comportamiento de la probabilidad de caídas de plantas en función de la variación del diámetro promedio de raíces laterales del cuadrante 1. A medida que el Diámetro Promedio de Raíces Laterales del Cuadrante 1 (DPRL_C1) aumenta, la probabilidad de caída de plantas también aumenta. A partir del DPRL_C1 igual a 7,1 mm, la probabilidad de caída de plantas supera el 50%.

FIGURA 1
 Modelamiento de la probabilidad de daño por viento en *pinus radiata*
 en Chile: una aplicación de modelos logit
 Gráfico de probabilidad de caída de plantas



4. DISCUSIÓN

Parte aérea. Las variables relacionadas con la parte aérea de las plantas no resultaron significantes en la construcción del modelo, presentándose valores-p para el DAP, DAC y Altura de 0,266, 0,315 y 0,441 respectivamente (Tabla II).

Variables índices. Las variables índices no resultaron significantes en la formulación del modelo (Tabla II), esto difiere de lo obtenido por Valinger y Fridman (1997), quienes determinaron un modelo de probabilidad para el daño de viento y nieve en rodales adultos (67 y 82 años) de *Pinus sylvestris*, a partir de las variables dendrométricas diámetro superior (diámetro a los 3 ó 5 m de altura) y la proporción altura/DAP.

Variables suelo-planta. Las variables preparación de sitio y tipo de suelo no resultaron significantes en la construcción del modelo. Si bien esta última variable por sí sola no explicaría la caída de plantas, existe una estrecha interacción entre el suelo y las raíces que no se puede omitir. Es así como Coutts (1986), Coutts y Grace (1995), Coutts *et al.* (1999), definieron 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) y la resistencia del suelo a romperse en los límites del plato radicular, por lo que la caída de plantas de *P. radiata* se explicaría con variables que están bajo el suelo, es decir, las raíces. De la totalidad de las variables suelo-planta evaluadas, se determinó que sólo el Diámetro Promedio de las Raíces Laterales del Cuadrante 1 (DPRL_C1) fue significativa para el modelo propuesto, con un valor-p de 0,016 y un coeficiente de determinación de Nagelkerke de 0,275 (Tablas IV y V respectivamente), presentándose una sensibilidad de un 68,4%, correspondiente al porcentaje de acierto en el pronóstico de plantas caídas (Tabla IV). El modelo describe que una planta de *P. radiata* de 2 años, tiene una mayor probabilidad de caída, mientras mayor sea el DPRL_C1 (figura 1). Esto se puede deber a que las raíces laterales de menor diámetro poseerían una mayor capacidad de elongación que raíces laterales de mayor diámetro. Este resultado coincide con lo determinado por Watson (2000) en una plantación de *P. radiata* de 10 años, donde midió durante una tormenta con viento de hasta 77 km/h, una inclinación de 25 cm del fuste del árbol a 2 m del suelo, lo cual generaba una elongación de las raíces de entre 0,61 mm al lado de sotavento y 0,93 mm al lado de barlovento, por lo que se establecería que la zona crítica para la caída correspondería al cuadrante de barlovento. De las cuatro componentes del sistema de anclaje señaladas por Coutts (1983), 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. Este mismo autor indica también, que cuando un árbol es movido lateralmente por la fuerza del viento, en el lado de sotavento se generan fuerzas de compresión sobre la superficie del suelo, mientras que en el lado de barlovento, donde el sistema suelo-raíz se levanta, el sistema está sometido a tensiones, y no hay una superficie de presión para contrarrestar su movimiento ascendente.

5. CONCLUSIONES

El modelo de probabilidad para la caída de plantas de *P. radiata* incorporó como única variable explicativa el Diámetro Promedio de Raíces Laterales en el lado de barlovento, de modo que a medida que el diámetro de las raíces laterales aumenta, la probabilidad de caída se acrecienta.

6. RECOMENDACIONES

Como una aplicación práctica de los resultados de este estudio, se propone reorientar los sistemas de producción de plantas y de establecimiento en terreno, de modo de minimizar el riesgo provocado por el viento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ELECTRÓNICAS

- [1]. ALARCÓN, C., GROSSE, H. Y VILLARROEL, A. (1986), Daños causados en plantaciones de *Pinus radiata* por efecto del viento. Instituto Forestal-Filiar CORFO. Concepción. Chile.
- [2]. ALDERETE, A. (2006), Fundamentos del Análisis de Regresión Logística en la investigación Psicológica. *Evaluar*; 6, 52-67.
- [3]. ÁLVAREZ, J., ET AL. (2001), Inclinación y derribo de árboles por el viento. Informe de circulación restringida. Forestal Mininco S.A. Concepción, Chile. 34 p.
- [4]. COUTTS, M. (1983), Root architecture and tree stability. *Plant and Soil*; 71, 171-188
- [5]. COUTTS, M. (1986), Components of tree stability in Sitka spruce on peaty, gley soil. *Forestry*; 59 (2), 173-197.
- [6]. COUTTS, M. Et GRACE, J. (1995), *Wind and Trees*. Cambridge University Press, 501 p.
- [7]. COUTTS, M., NIELSEN, C. Y NICOLL, B. (1999), The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant and Soil*; 217(1-2), 1-15.
- [8]. FRI. (1987), What's new in forest research? N° 147. Forest Research Institute. Rotorua, New Zealand.