

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

MODELO PREDICTIVO DE SOBREVIVENCIA DE CEPAS DE
***Eucalyptus globulus* Y EVALUACIÓN FINANCIERA PARA**
DIFERENTES ALTERNATIVAS DE MANEJO

por

María del Pilar GASPARRI PITA

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Vegetales

MONTEVIDEO

URUGUAY

Diciembre 2019

Tesis aprobada por el tribunal integrado por: Ing. Agr. (MSc) Andrés Hirigoyen, Ing. Agr. (PhD) Cecilia Rachid, Lic. Ec. (PhD) Virginia Morales, el 24 de julio del 2020.

Autora: Lic. Biol. Pilar Gasparri.

Director: Dr. Gustavo Balmelli

Dedico este trabajo a Guillermo, donde estés, gracias por confiar.

AGRADECIMIENTOS

A INIA por permitirme desarrollar este trabajo, al programa de Becas que permitió mi dedicación al mismo.

A las empresas participantes por su disposición e interés en cada paso de este trabajo.

A Gustavo Balmelli por su tutoría, que fue más allá de su trabajo, apoyándome en cada situación que atravesé durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por ser tan excelente ser.

A Andrés Hirigoyen, por su invaluable apoyo en la estadística y más de este trabajo. Gracias por tu motivación y estar al pie de cañón.

A Virginia Morales por su tiempo y dedicación en mostrarme el mundo de la economía.

A mi familia, por compartir su tiempo con este trabajo. Sebastián, Clara y Facundo; son mi motor.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	VII
SUMMARY	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 HIPÓTESIS	4
1.2 OBJETIVOS GENERALES	5
1.2.1 <u>Objetivos específicos</u>	5
2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	7
2.1 ESTIMACIÓN DE REBROTE DE CEPAS	7
2.1.1 <u>Zona de estudio</u>	7
2.1.2 <u>Características de los rodales</u>	7
2.1.3 <u>Toma de datos</u>.....	9
2.1.4 <u>Análisis estadísticos</u>	12
2.1.4.1 Modelo predictivo de rebrote de cepas individuales...	14
2.1.4.2 Modelo predictivo de probabilidad de rebrotes a nivel de parcela	16
2.2 ANÁLISIS ECONÓMICO	18
2.2.1 <u>Datos para el análisis económico</u>.....	19
2.3 HERRAMIENTA DE APOYO A LA GESTIÓN.....	23
3. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	24
3.1 MODELO PREDICTIVO A NIVEL DE CEPA.....	26
3.2 MODELO PREDICTIVO A NIVEL DE PARCELA.....	29
3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO	33
3.3.1 <u>Escenario base</u>.....	33

3.3.2 <u>Análisis de sensibilidad</u>	35
3.4 HERRAMIENTA DE APOYO A LA GESTIÓN.....	41
4. <u>CONCLUSIONES</u>	45
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	47
6. <u>ANEXO</u>	52
7. <u>PREDICTIVE MODEL OF STUMP REGROWTH IN <i>EUCALYPTUS</i> <i>GLOBULUS</i> BASED ON PRE-HARVEST INFORMATION</u>	53

RESUMEN

Eucalyptus globulus fue una de las especies más plantadas en el país; sin embargo, debido a su susceptibilidad a diversos problemas sanitarios, viene siendo sustituido por *E. grandis*, *E. dunnii* y *E. smithii*. Luego que una plantación es cosechada, la decisión de realizar manejo de rebrotes o replantar depende del resultado económico esperado. El problema que enfrentan las empresas para tomar dicha decisión es la dificultad para estimar la productividad esperada de los rebrotes en la siguiente rotación. En esta investigación se plantearon tres objetivos: a) ajustar modelos predictivos de sobrevivencia de cepas en plantaciones de *Eucalyptus globulus*; b) comparar el resultado económico esperado en la siguiente rotación para dos alternativas productivas: manejo de rebrotes y replantación; y c) integrar la información generada en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Se establecieron 33 parcelas en plantaciones próximas a su cosecha, en las cuales se registraron datos dasométricos y estado sanitario de cada árbol. Se evaluó el porcentaje de rebrotes 8 meses luego de la cosecha, y con estos datos se ajustaron dos modelos mediante regresión logística, uno para predecir la probabilidad de rebrote a nivel de cepa individual y otro a nivel de parcela. Se calcularon dos indicadores económicos (VAN y TIR) para determinar la conveniencia de manejar la siguiente rotación como rebrotes (con y sin uso de fungicidas) o de realizar una replantación (con *E. dunnii*, *E. smithii* y *E. globulus*). El modelo ajustado a nivel de cepa individual incluyó como variables explicativas, el material genético, el DAP, el tipo de maquinaria utilizada para la cosecha, la presencia de canchros en el fuste y la presencia de muerte apical. El modelo a nivel de parcela presentó las mismas variables explicativas, menos la presencia de muerte apical. Los análisis económicos mostraron que, bajo los supuestos considerados, las cinco alternativas estudiadas para la segunda rotación son económicamente viables, siendo el manejo de rebrotes con aplicación de fungicidas la alternativa más rentable y que presenta menor sensibilidad ante cambios en los costos de producción y/o precios de la madera.

Palabras clave: rebrote, sanidad, análisis financiero, rentabilidad

SUMMARY

Predictive model for survival of stumps on *Eucalyptus globulus* and financial evaluation of different management alternatives

Eucalyptus globulus was one of the most planted species in the country. However, due to its susceptibility to various health problems, *E. globulus* has been replaced by *E. grandis*, *E. dunnii* and *E. smithii*. The decision to keep the plantation as a coppice crop or to replant depends on the expected economic result. The problem that companies face in making such a decision is the difficulty in estimating the expected productivity in the next rotation. Three objectives were proposed in this research: a) to fit predictive models for survival of stumps in plantations of *Eucalyptus globulus*; b) to compare the expected economic result in the next rotation for two productive alternatives: regrowth management and replanting; and c) to integrate the information generated in objectives a and b into a decision support tool. Thirty-three plots were established in plantations next to their harvest, in which dasometric data and health status of each tree were recorded. At 8 months post-harvest, the percentage of regrowth was evaluated and two models were adjusted with these data using logistic regression, one to predict the probability of regrowth at the individual stump level and another at the plot level. Two financial indicators (NPV and IRR) were evaluated to determine the suitability of handling the next rotation as coppice crop or replanting. The model adjusted at the individual stump level included as explanatory variables for the probability of regrowth, the genetic material, the DBH, the type of machinery used for harvest, the presence of cankers in the bark and the presence of apical death. The plot-level model included the same explanatory variables, except the presence of apical death. The economic analyzes showed that, under the assumptions considered, the five alternatives studied are economically viable, being the management of regrowths with fungicide application the most profitable and least risky alternative for the second rotation.

Keywords: regrowth, sanitation, financial analysis, profitability

1. INTRODUCCIÓN

A partir de la Ley Forestal N° 15.939 (Uruguay, Poder Legislativo, 1988), implementada en Uruguay en 1989, se produjo un rápido incremento del área forestada, existiendo actualmente un total aproximado de un millón de hectáreas de bosques plantados. El género *Eucalyptus* es el más plantado, con 688.524 hectáreas efectivas (MGAP-DGF, 2018).

En Uruguay se produce madera principalmente para fines industriales, siendo los productos predominantes: celulosa, rolos, chips, madera aserrada y madera contrachapada. El destino de la producción puede variar según la especie y el manejo de la plantación, que puede permitir madera de calidad para aserrado y debobinado, principalmente con *E. grandis*, o la producción de celulosa, siendo las principales especies *E. grandis*, *E. globulus*, *E. maidenii* y *E. dunnii* (Giambruno y López., 2010).

E. globulus fue la especie más plantada en el país, llegando en el año 2013 a cubrir 309 mil hectáreas (DIEA, 2014). Pero debido a su alta susceptibilidad a enfermedades y plagas y a su falta de adaptación a las zonas Norte, Oeste y Centro del país, donde se reportó una productividad muy por debajo de lo esperado (Balmelli y Resquín, 2002), la especie fue sustituida en dichas zonas por *E. grandis* y *E. dunnii*, quedando restringida mayoritariamente al Sureste del país, donde aún es la especie predominante.

E. globulus es nativo de Tasmania y el sureste de Australia. Está distribuido en zonas con latitudes desde 37° a 43°30 'S, en localidades costeras y continentales, con altitudes desde el nivel del mar a 450 m (Broomker y Kleinig, 1990). Fue el primer eucalipto plantado extensivamente fuera de su zona de origen, siendo introducido en el Uruguay en el año 1853 (FAO, 1981). Posee una de las mejores maderas como materia prima para la fabricación de pasta kraft blanqueada y su aplicación posterior en la fabricación de diferentes clases de papeles. Presenta una densidad media global de 553 kg/m³, superando en densidad básica al *E. grandis* en un 22% y al *E. dunnii* en un 16% (Toval, 2010). Según Toval (2010), el rendimiento bruto en cocción de *E. globulus* es de 55,6%, superando en un 13% a *E. grandis*, *E. bicostata* y *E. maidenii* y

en un 30% a *E. dunnii*. Doldán *et. al.*, (2008) también reportan altos valores de rendimiento bruto de celulosa, con un promedio de 54,5%. Estas características determinan que el precio de la madera de *E. globulus* sea mayor que el que se obtiene con otras especies de eucalipto y que exista demanda del mercado externo por la especie. Existen pocos lugares en el mundo donde se planta *E. globulus* a escala comercial: Australia, Chile, España, Nueva Zelanda, Portugal y Uruguay, por lo cual la plantación de dicha especie permite a los productores tener acceso tanto al mercado externo como al mercado interno (Morales Olmos *et. al.*, 2018).

La introducción accidental de un patógeno foliar, *Teratosphaeria nubilosa*, en el año 2007 (Pérez *et. al.*, 2009), tuvo consecuencias muy importantes para las plantaciones de *E. globulus*. Este patógeno afecta principalmente el follaje juvenil y el follaje intermedio, causando manchas necróticas, defoliación prematura y, en infecciones severas, muerte de ápices y ramas. Según Balmelli (2014), la defoliación provocada por *T. nubilosa* en *E. globulus* puede generar pérdidas de crecimiento al año de iniciada la epidemia de hasta 44%. La frecuencia y severidad de los daños provocados por el patógeno, sumado a que aún no hay genotipos resistentes disponibles en el país, ha llevado a la sustitución paulatina de *E. globulus* por especies resistentes a la enfermedad, como *E. dunnii*, *E. grandis* y *E. smithii*. De todas formas, actualmente existen 149 mil hectáreas ocupadas por *E. globulus* (MGAP-DGF, 2018), principalmente en la zona Sureste. El sector productor de *E. globulus* presenta características diferentes al resto del sector forestal, con una participación importante de productores individuales y grupos de productores asociados (Morales Olmos *et. al.*, 2018). Barrios (2011), considera que la estrategia adecuada para el sector es la exportación del 60% de sus productos y la venta en el mercado interno del resto. Según Rodríguez (2011), la mejor manera de proteger al productor es continuar la corriente exportadora para arbitrar los valores que operen en el mercado local.

Las especies del género *Eucalyptus* tienen una gran capacidad de regeneración después del corte. Esta capacidad, que se debe a la presencia de brotes adventicios, así como a lignotubérculos en la base del árbol, permite el manejo de una segunda rotación mediante rebrotes (plantación tallar). *E. globulus* presenta buena capacidad de rebrote,

con porcentajes de 67% (Whittock *et. al.*, 2003) hasta 93% (Prado *et. al.*, 1990). La productividad de la plantación como rebrote depende de la supervivencia de las cepas y su subsiguiente tasa de crecimiento. Según Hamilton (2005), el stock de cepas rebrotadas debe estar por encima del 75%, de no ser así se debería considerar una replantación. Schönau (1991), sugiere un stock mínimo de 1000 cepas viables por hectárea para un manejo por rebrote exitoso, dado que con un stock inferior sería difícil compensar la muerte de cepas con la retención de más de un brote por cepa. Según este autor, si el stock de cepas y el manejo de las mismas es el indicado, se puede obtener un rendimiento similar a la del cultivo original, lo que representa una alternativa de producción muy atractiva dada la eliminación de costos de implantación. Un estudio comparativo realizado por Drake *et. al.*, (2009), entre la fisiología de los rebrotes y de las plantaciones por semillas en etapas tempranas de *E. globulus* mostró que la gran cantidad de biomasa bajo tierra del árbol original le provee a los rebrotes una mayor reserva y un mayor suministro de nutrientes del suelo, permitiendo un crecimiento vigoroso temprano de los rebrotes.

Diversos factores pueden afectar la supervivencia de las cepas: factores genéticos (especie, procedencia o clon), factores ambientales (tipo de suelo, precipitaciones, etc.) y factores operacionales (altura del tocón, daño a la cepa durante la cosecha, compactación del suelo, momento de cosecha y cobertura de las cepas por residuos) (Stape, 1997). La edad, el tamaño y el vigor del árbol previo a la cosecha también pueden afectar el potencial de rebrote (Little y MacLennan, 2001), lo mismo que el estado sanitario de los árboles (Balmelli y Resquín, 2005). Diferencias entre las especies de *Eucalyptus* en la capacidad de rebrote de cepas han sido reportadas en diferentes estudios (Higa y Sturion, 1997; Little y Gardner, 2003). Klein *et. al.*, (1997), en un estudio en Brasil sobre factores operacionales que afectan el rebrote, reportan que el manejo de residuos aumentó en un 24% la supervivencia de las cepas de *E. grandis* y *E. saligna* y que a mayor altura de corte mayor sobrevivencia de las cepas, no encontrando diferencias estadísticamente significativas a partir de los 10 cm de altura de la cepa. A nivel nacional, Balmelli y Resquín (2005), reportaron en *E. globulus* un promedio de rebrotes del 62.5%, y una tendencia a que a mayor DAP menor mortandad. Estos autores también evaluaron el efecto de enfermedades del

fuste, reportando que la presencia de *Inocutis jamaicensis* no afectó la capacidad de rebrotes, mientras que la presencia de brotes epicórmicos y de canchales en la corteza tuvieron un efecto negativo sobre la capacidad de rebrotes. Otro estudio nacional sobre el rebrote de cepas de *E. globulus* y *E. maidenii*, reporta que cuando la corteza de la cepa estaba desprendida en más de un 40% se reducía la supervivencia del rebrote (Alonso *et. al.*, 2012).

El cambio de especie es una decisión crítica para la empresa forestal, ya que la madera de las especies alternativas a las de *E. globulus* tienen menor valor comercial y menor demanda exterior, lo que puede generar menores ingresos y/o pérdida de mercados. De hecho, de las especies utilizadas actualmente para sustituir a *E. globulus*, *E. dunnii* y *E. grandis* no cuentan con mercado internacional y si bien se espera que exista mercado externo para *E. smithii* (Alberto Rodríguez, com. pers), el mismo es aún incierto.

La decisión de mantener la plantación en la siguiente rotación (mediante el manejo de rebrotes) o replantar depende del resultado económico esperado para ambas alternativas. El problema que enfrentan las empresas para tomar dicha decisión es la dificultad para estimar la productividad esperada en la siguiente rotación, lo cual depende en buena medida de la población (número de árboles por hectárea) que se tendrá en la alternativa de manejo de rebrotes. Esta dificultad, o incertidumbre, está dada por la escasa información nacional existente sobre los factores que inciden en la sobrevivencia de las cepas post cosecha. Por tal motivo, y con el propósito de contribuir a la toma de decisiones en el sector forestal, en esta investigación se plantean tres hipótesis con sus correspondientes objetivos.

1.1 HIPÓTESIS

a) La probabilidad de rebrote en plantaciones de *E. globulus* en el sureste del Uruguay se asocia con su origen genético, el DAP y el estado sanitario del árbol al momento de la cosecha, el tipo de cosecha y el manejo de residuos post cosecha.

- b) El manejo de rebrotes de *E. globulus* es más rentable que la replantación con clones mejorados por sanidad o con especies alternativas como *E. dunnii* y *E. smithii*.
- c) Es posible desarrollar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones integrando la probabilidad de rebrote de cepas y el análisis económico de alternativas de manejo de rebrotes y replantación.

1.2 OBJETIVOS GENERALES

- a) Desarrollar modelos predictivos de sobrevivencia de cepas en plantaciones de *E. globulus* en función de los factores que afecten dicha variable.
- b) Comparar el resultado económico esperado en la segunda rotación para dos alternativas productivas: manejo de rebrotes y replantación.
- c) Desarrollar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, mediante la integración de la información obtenida en los objetivos a y b.

1.2.1 Objetivos específicos

- a.1) Ajustar un modelo de predicción de sobrevivencia de cepas a nivel de cepa individual.
- a.2) Ajustar un modelo de predicción de sobrevivencia de cepas a nivel de parcela.
- b.1) Estimar el resultado económico de las alternativas más probables para el manejo de una segunda rotación: manejo de rebrotes con y sin aplicación de fungicida, replantación con *E. dunnii*, *E. smithii* y *E. globulus* clonal.
- b.2) Realizar un análisis de sensibilidad para las variables con mayor impacto en el resultado económico.
- c.1) Generar una herramienta que permita predecir la población de cepas vivas a obtener en la siguiente rotación en base a información productiva y estado sanitario de la plantación previo a la cosecha.

c.2) Generar una herramienta que permita estimar el resultado económico de diferentes alternativas para la siguiente rotación utilizando información de la plantación previa a la cosecha.

Para el cumplimiento del primer objetivo se instalaron parcelas en plantaciones de *E. globulus* previo a ser cosechadas, en dos localidades de la región sureste del país. En dichas parcelas se realizaron mediciones dasométricas y evaluaciones sanitarias precosecha y se evaluó el porcentaje de rebrotes a los 8 meses postcosecha. Para el segundo objetivo se calcularon los valores actuales netos y las tasas internas de retorno para dos alternativas de manejo de rebrotes y tres alternativas de replantación. Para el tercer objetivo se integraron diferentes funciones a través de Visual Basic de la aplicación Excel.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 ESTIMACIÓN DE REBROTE DE CEPAS

2.1.1 Zona de estudio

Para el presente estudio se seleccionaron rodales de *E. globulus* a cosecharse en junio-julio del 2017, en tres localidades de la zona Sureste de Uruguay, pertenecientes a las empresas Redalco, Forestal Atlántico Sur e Iberpapel (Figura 1).

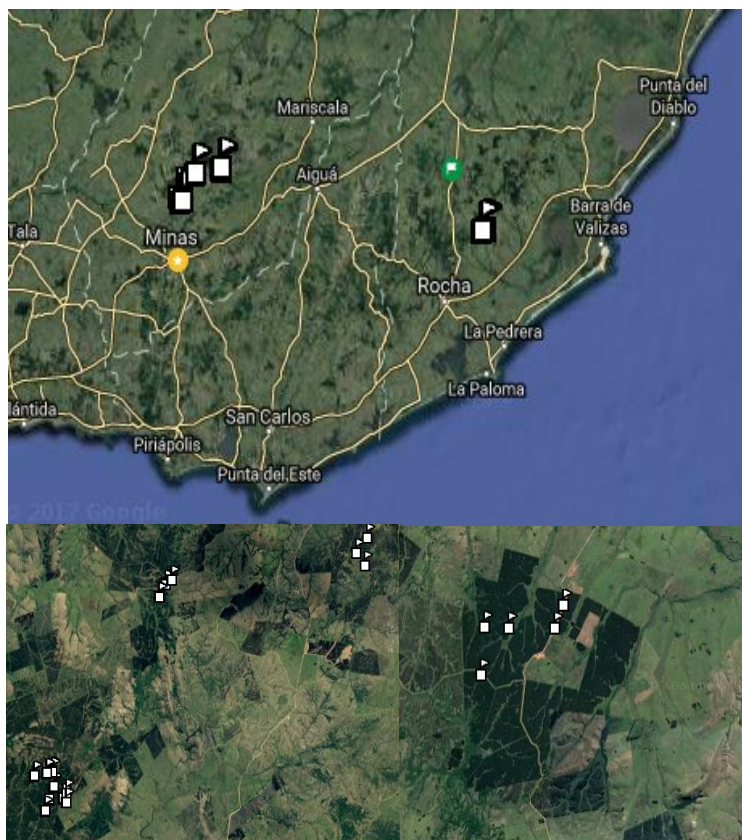


Figura 1. Localización de los rodales de estudio.

2.1.2 Características de los rodales

Se seleccionaron rodales con diferente material genético (semilla Jeeralang, Salus, Madalya, Yeodene y un clon) y diferente edad (9, 11, 12 y 13 años), que serían

cosechados con Feller buncher o Harvester y que tendrían o no manejo de residuos postcosecha (destape manual del tocón). Considerando las variables genética, maquinaria de cosecha y manejo de residuos, se disponía de rodales con once combinaciones diferentes (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características de los rodales de *E. globulus* donde se instalaron las parcelas comprendidas en el estudio.

Empresa	Localidad	Genética	Maquinaria de cosecha	Manejo Residuos
Redalco	Puntas de Don Carlos	Madalya	Harvester	Si
Redalco	Puntas de Don Carlos	Yeodene	Harvester	Si
FAS	Barriga Negra	Jeeralang	Harvester	Si*
FAS	Barriga Negra	Jeeralang	Harvester	No*
FAS	Barriga Negra	Jeeralang	Harvester	Si
Iberpapel	Arequita	Salus	Harvester*	Si
Iberpapel	Arequita	Salus	Feller buncher*	Si
Iberpapel	Arequita	Clon	Harvester*	Si
Iberpapel	Arequita	Clon	Feller buncher*	Si
Iberpapel	Arequita	Jeeralang	Harvester	Si*
Iberpapel	Arequita	Jeeralang	Harvester	No*

(*) En estas combinaciones las parcelas fueron apareadas, minimizando la variación por factores extrínsecos.

En cada una de las 11 combinaciones analizadas se instalaron 3 parcelas (3 repeticiones) al azar. Sin embargo, en cada repetición de las combinaciones 6-7 y 8-9 las parcelas se instalaron de forma apareada para evaluar el efecto del tipo de cosechadora en igualdad de las demás características de las parcelas. De igual forma, para evaluar el efecto del manejo de residuos, se instalaron apareadas las parcelas de las combinaciones 3-4 y 10-11. En todos los casos el tamaño de las parcelas fue de 1000 m², con un ancho preestablecido de 6 filas de árboles. Para instalar cada parcela se midió el ancho de las 6 filas (más las entrefilas correspondientes) y luego se calculó el largo necesario para obtener los 1000 m². Se georreferenció el primer árbol de la primera fila y se marcó con una chapa numerada el primer árbol de cada fila.

2.1.3 Toma de datos

El primer relevamiento de las parcelas se realizó precosecha (mayo 2017), donde se evaluaron datos dasométricos y estado sanitario. Se tomaron datos de número de árboles plantados, número de árboles en pie, diámetro a la altura de pecho (DAP) de todos los árboles y altura de los árboles en las filas 4 y 6, con Vertex digital.

A partir de los datos obtenidos se estimó: la densidad inicial de plantación y el número de árboles en pie por hectárea; la altura de cada árbol, utilizando el modelo de Petterson (Petterson, 1955); la altura media dominante (AMD), estableciéndose el número de árboles por parcela para dicha estimación en base a García (García, 1998); el área basimétrica (G) y el diámetro cuadrático medio (Dg) de la parcela. Finalmente se estimó el volumen comercial de madera por hectárea, mediante el modelo de Hirigoyen (Hirigoyen, 2016) y el incremento medio anual (IMA). En el Cuadro 2 se presenta el resumen de los datos dasométricos de las parcelas.

A nivel sanitario se registró, en todos los árboles, la presencia de: *Inocutis jamaicensis*, canchros en la corteza por *Botryosphaeria* y/o *Coniothyrium*, brotes epicórmicos en el fuste y muerte apical descendente. Se realizó una evaluación sanitaria dicotómica (presencia/ausencia) con el valor 0 para ausencia y 1 para presencia.

Para *Inocutis jamaicensis* se consideró como presencia el signo y/o el síntoma (Figura 2 a y b), para canchros en la corteza se registró como ausencia cuando el síntoma era leve o ausente y presencia cuando era marcado (Figura 2 c y d). Para brotes epicórmicos de fuste se consideró como presencia cuando existían más de 3 brotes (Figura 2 e) y se registró como presencia de muerte apical descendente cuando el árbol presentaba la punta seca (Figura 2 f). El porcentaje de árboles con presencia de cada síntoma a nivel de parcela se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 2. Estadísticos descriptivos de los datos dasométricos de las parcelas.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Densidad Plantación (arb/há)	1219	920	1740	224,2
Supervivencia (%)	74,4	52,9	93,6	11,4
Árboles en pie (arb/há)	890	700	1180	124,4
DAP (cm)	18,3	16,1	21,8	1,3
Volumen comercial (m ³ /há)	198,2	126,9	337,3	54,7
IMA (m ³ /há/año)	17,51	11,53	25,94	3,7



Figura 2. Evaluación sanitaria: a) Fructificación (basidiocarpos) de *Inocutis jamaicensis*, b) síntoma característico (achatamiento del fuste) de *Inocutis jamaicensis*, c) ausencia de canchros en corteza por *Botryosphaeria* y/o *Coniothyrium*, d) presencia de canchros, e) brotes epicórmicos y f) muerte apical descendente.

Cuadro 3. Estadísticos descriptivos del estado sanitario de las parcelas.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Porcentaje con Muerte apical	5%	0%	18%	6%
Porcentaje con Brotes epicórmicos	8%	0%	35%	10%
Porcentaje con Cancros	5%	0%	21%	6%
Porcentaje con <i>Inocutis</i>	9%	0%	30%	7%

La evaluación del rebrote o no de las cepas se realizó a los 8 meses post cosecha (febrero-marzo 2018). Se registró la existencia de rebrotes en cada cepa, sin considerar cantidad ni calidad de los mismos (Figura 3).



Figura 3. Evaluación de rebrotes: a) cepa rebrotada en parcela sin manejo de residuos; b) cepa rebrotada en parcela con manejo de residuos; c) cepa con rebrote desprendido; d) cepa sin rebrote. Las situaciones a, b y c se consideran como rebrotes presentes (1), mientras que la situación d se registra como ausencia (0).

2.1.4 Análisis estadísticos

En primera instancia, se analizaron los efectos individuales de cada variable mediante una prueba de ANOVA y, cuando correspondió, se realizó un test de comparación de medias. Luego se ajustaron dos modelos predictivos de rebrote de cepas, uno a nivel de cepa individual y otro a nivel de parcela. En ambos casos se utilizó el análisis de regresión logística, método estadístico que permite evaluar la probabilidad de que ocurra un evento, en este caso el rebrote de las cepas, en función de las categorías o valores de las variables independientes, en este caso fuente de semilla, tipo de cosecha, manejo de residuos y variables de crecimiento y sanitarias de los árboles.

Para este tipo de respuesta dicotómica se han propuesto diferentes funciones de distribución, siendo la distribución logística (Hosmer y Lemeshow, 2000) la de mayor uso.

El modelo de regresión logística que se utilizó fue:

$$\pi(x) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n}} \quad (1)$$

Donde $\pi(x)$ es la probabilidad que ocurra el evento, β_0 es la constante y los β_n son los coeficientes de los predictores x_n del modelo. Mediante una transformación logit de $\pi(x)$ se linealizan los parámetros, obteniendo:

$$g(x) = \ln \left[\frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} \right] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (2)$$

Donde $g(x)$ representa, en una escala logarítmica, la diferencia entre las probabilidades de ocurrencia y no ocurrencia del evento, lo cual, al ser una función lineal de las variables explicativas, facilita la estimación y la interpretación del modelo.

Para el ajuste de ambos modelos, se seleccionaron las variables independientes mediante el procedimiento de selección paso a paso o *stepwise* (Efroymsen, citado por Pacheco *et al.*, 2007). Este método contrasta la entrada de cada variable basándose en la significación del estadístico de puntuación y contrasta la eliminación basándose en la probabilidad del estadístico de Wald. De esta forma se definieron varios modelos alternativos y para seleccionar el modelo con mejor ajuste se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC) (Akaike, 1974). Un menor valor de AIC indica que el modelo se ajusta mejor a los datos experimentales y/o que es un modelo más simple.

Mediante el análisis de gráficos se examinaron las relaciones entre los datos y los residuos ajustados para detectar comportamientos anómalos.

2.1.4.1 Modelo predictivo de rebrote de cepas individuales

Para el ajuste del modelo de rebrote a nivel de cepa individual, se contó con una población de estudio de 2849 árboles. Se analizó la relación probabilística entre la variable dicotómica, rebrote de cepa, con las variables explicativas estudiadas. El tipo de maquinaria y el manejo de residuos se analizaron como variables dicotómicas. En el caso de la fuente de semilla se emplearon variables dummy, que se definen como variables cualitativas dicotómicas ficticias. La categoría Clon se tomó como referencia y cada una de las variables creadas, Salus, Madalya, Yeodene y Jeeralang, entraría en el modelo como variable dicotómica, con presencia con valor 1 y ausencia con valor 0. El DAP se consideró como una variable continua y las variables sanitarias fueron codificadas como variables nominales categóricas (presencia o ausencia de síntoma). La clasificación de las variables utilizadas para este modelo se resume en el Cuadro 4.

El ajuste del modelo individual se evaluó a través de la prueba de bondad de ajuste de Hosmer-Lemeshow (C) (Hosmer y Lemeshow, 2000), que consiste en comparar los valores previstos (esperados) por el modelo con los valores observados. Ambas distribuciones, esperada y observada, se contrastan mediante una prueba de χ^2 . La hipótesis nula del test de Hosmer-Lemeshow es que no hay diferencias entre los valores observados y los valores predichos (el rechazo de este test indicaría que el modelo no está bien ajustado).

El modelo de regresión logística genera para cada individuo valores de probabilidad pronosticada en el rango entre 0 y 1. Para establecer un punto de corte óptimo dentro de este rango, que clasifique a cada individuo como “rebrotan” o como “no rebrotan”, se realizó un análisis de curvas ROC (*receiver operating characteristic curve*) (Cerdas y Cifuentes, 2012; Fawcett, 2006). Este método estadístico fue utilizado con dos propósitos: determinar el punto de corte y evaluar la capacidad discriminativa de nuestro modelo diagnóstico, es decir, la capacidad de diferenciar entre los árboles que rebrotan y los que no lo hacen.

Cuadro 4. Variables analizadas a nivel de cepa individual.

Variable dependiente	Tipo	
Rebrote de cepa	Nominal Categórica	0: No rebrota 1: Si rebrota
Variable Independientes	Tipo	
Fuente de semilla	Dummy	Referencia Clon Jeeralang } 0 Ausencia Madalya } 1 Presencia Salus } Yeodene }
Tipo de maquinaria	Nominal Categórica	0: Feller 1: Harvester
Manejo de Residuos	Nominal Categórica	0: Sin manejo 1: Con manejo
Rebrote apical	Nominal Categórica	0: Ausencia 1: Presencia
Muerte apical	Nominal Categórica	0: Ausencia 1: Presencia
<i>Inocutis jamaicensis</i>	Nominal Categórica	0: Ausencia 1: Presencia
Cancros por <i>Coniothyrium</i> y/o <i>Botryospaheria</i>	Nominal Categórica	0: Ausencia 1: Presencia
Diámetro altura de pecho	Continua	

El punto de corte se seleccionó mediante el índice de Youden (Youden, 1950), calculado según la fórmula (sensibilidad + especificidad – 1). El punto de corte óptimo es aquel que determina la sensibilidad y especificidad más alta conjuntamente, es decir, que presenta el mayor índice de Youden.

Como medida de discriminación del modelo se utilizó el área bajo la curva ROC (AUC), la cual refleja qué tan bueno es el test para distinguir entre individuos que rebrotan y que no a lo largo de todo el rango de puntos de corte posibles. Se considera que a partir de un AUC de 0,75 la discriminación del modelo es aceptable (Cerdas y Cifuentes, 2012; Fawcett, 2006).

Se utilizaron los paquetes Stats y pROC del software R (R Core Development Team, 2019) para el ajuste de los modelos de regresión logística y el análisis de curvas ROC, respectivamente.

2.1.4.2 Modelo predictivo de porcentaje de rebrotes a nivel de parcela

Para el ajuste de este modelo se utilizó la parcela como unidad experimental. El tipo de maquinaria y el manejo de residuos se analizaron como variables dicotómicas, y la fuente de semilla como variables dummy; de igual forma que el modelo anterior. La variable DAP entró al set de variables predictoras como la proporción de árboles mayores a determinado valor, el cual divide al set de datos en dos grupos más homogéneos en función de su diámetro. Se evaluaron diferentes puntos de corte para homogeneizar los grupos mediante árboles de clasificación y regresión (Schiattino y Silva, 2008). Las variables sanitarias se analizaron como la proporción de árboles con presencia de cada síntoma. En el Cuadro 5 se presenta el resumen de las variables analizadas en cada una de las 33 parcelas establecidas.

Para evaluar la calidad de ajuste del modelo se utilizó el coeficiente de determinación Pseudo R^2 de Mc-Fadden (Pando Fernández y San Martín Fernández, 2004), su rango teórico de valores es de 0 a 1, considerándose un buen ajuste cuando se encuentra entre 0,2 y 0,4 y excelente para valores mayores.

La consideración de la verosimilitud resulta imprescindible para valorar la capacidad predictiva del modelo, para ello se empleó la desviación del modelo (deviance), que se calculó utilizando la fórmula:

$$L = 2 \ln \left(\frac{\text{verosimilitud modelo nulo}}{\text{verosimilitud modelo}} \right) \quad (3)$$

Cuadro 5. Variables analizadas a nivel de parcela.

Variable dependiente	Tipo	
Rebrote de cepa	Cuantitativa	Proporción de cepas rebrotadas
Variable Independientes		
		Referencia Clon
Fuente de semilla	Dummy	Jeeralang } 0 Ausencia
		Madalya } 1 Presencia
		Salus }
		Yeodene }
Tipo de maquinaria	Nominal Categorica	0: Feller 1: Harvester
Manejo de Residuos	Nominal Categorica	0: Sin manejo 1: Con manejo
<i>Inocutis jamaicensis</i>	Cuantitativa	Proporción de árboles con presencia
Cancros por <i>Coniothyrium</i> y/o <i>Botryospaheria</i>	Cuantitativa	Proporción de árboles con presencia
Brotos epicòrmicos	Cuantitativa	Proporción de árboles con presencia
Muerte apical	Cuantitativa	Proporción de árboles con presencia
DAP	Cuantitativa	Proporción de árboles con DAP mayor al punto de corte.

2.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

Se evaluó la rentabilidad de cinco posibles alternativas para una segunda rotación de plantaciones para producción de pulpa. Las alternativas analizadas fueron: manejo de rebrotes, considerando o no el uso de fungicidas; replantaciones con nuevas especies, *E. dunnii* o *E. smithii*; replantación con *E. globulus* clonal, seleccionado por resistencia a *Teratosphaeria nubilosa* y productividad. La selección de las alternativas surgió de intercambios con empresas productoras de *E. globulus*, donde en conjunto manifestaron que estas son las principales alternativas que manejan al momento de reforestar, a excepción del clon que es una alternativa que, si bien aún no se encuentra disponible, el INIA espera obtener a corto plazo.

Para la evaluación económica se diseñó un flujo de fondos para un ciclo de cultivo de 11 años para todas las alternativas y se calcularon dos indicadores: el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). El VAN de una inversión puede definirse como la diferencia entre el valor presente de los ingresos y valor presente de los costos durante un período de tiempo (Bettinger *et. al.*, 2017).

$$VAN = \sum_{t=1}^T \left(\frac{It - Ct}{(1+i)^t} \right) - I_0 \quad (4)$$

Donde: T es el horizonte temporal de la inversión, t es el tiempo, It son los ingresos en el momento t , Ct son los costos en el momento t , i es la tasa de interés, I_0 es la inversión inicial (en el año 0.)

La TIR se define como la tasa de descuento que se requiere para llegar a un VAN de cero, o sea donde no se pierde ni se gana (Bettinger *et al.*, 2017). Otra forma de interpretar la TIR es asumir que representa el interés esperado de una inversión, lo cual es un reflejo de la eficiencia de la misma.

$$VAN = 0 = \sum_{t=1}^T \left(\frac{It - Ct}{(1+TIR)^t} \right) - I_0 \quad (5)$$

En el presente trabajo se utilizaron costos promedio de un manejo silvícola tradicional aplicado en la producción de madera para celulosa. Se

planteó un modelo teórico por hectárea efectiva para que el análisis sea generalizable a diferentes situaciones prediales.

Las estimaciones de los valores futuros en inversiones forestales están sujetos a incertidumbre (FAO, 1980), como la productividad del monte y la variación en los precios de venta de madera; por lo cual se realizó un análisis de sensibilidad para cada uno de los factores que se consideraran con mayor influencia en los costos e ingresos (Elevitch y Wilkinson, 2000): IMA, precio de madera, costo de flete y tasa de interés.

2.2.1 Datos para el análisis económico

Para las alternativas de manejo de rebrotes los costos considerados fueron: el destape de cepas (quitar el residuo de cosecha de las cepas para una mayor incidencia de luz), el control de hormigas, la aplicación de fungicidas y el raleo de rebrotes. Para las alternativas de replantación los costos considerados fueron: plantación (incluye la preparación del suelo, la aplicación de herbicidas, los plantines, la fertilización y la propia plantación) y control de malezas y hormigas post plantación.

En todas las alternativas se consideraron, además: el costo de administración, el costo de caminería (es decir la construcción o mantenimiento de vías de acceso y circulación para las tareas de cosecha y carga), el costo de cosecha y carga (comprende la tala, el trozado, el descortezado y el apilado a la orilla de los caminos y la carga de los camiones), y el costo del flete (transporte de la madera al punto de venta). Aunque la cosecha para plantaciones tallares es más dificultosa y suele generar mayores costos que la cosecha de plantación fustal, las empresas no consideraron que la diferencia fuese significativa, por lo cual se consideró el mismo costo de cosecha y carga para todas las alternativas analizadas. Para el cálculo del costo de flete se asumió que la venta de *E. globulus* y de *E. smithii* se realiza en Montevideo (planta de chipeado o puerto), encontrándose las plantaciones a una distancia promedio de 180 km y la de *E. dunnii* en Conchillas (planta de celulosa), a una distancia promedio de 360 km. No se incluyeron costos de seguros ni el valor de la tierra.

Con respecto a los impuestos, el trabajo se basó en la normativa vigente a la fecha para Uruguay, incluyendo texto ordenado 1996 Título N°4 y el decreto

reglamentario 150/007. Se aplicaron para todas las alternativas los impuestos generales: Contribución Inmobiliaria, Patrimonio, Sobretasa Patrimonio y la tasa adicional INIA (0,4% del valor en pie). A su vez, para las alternativas de rebrote se consideró que pertenecen a plantaciones previas al 2007 por lo cual no se les aplicó impuestos extras y para las de replantación el IRAE (25% del valor en pie).

Para todas las alternativas analizadas, se consideró como ingresos a los correspondientes a la venta de madera al final del turno. En todos los casos se consideró el momento de cosecha de la plantación existente como inicio del año 0 y se asumió que en las alternativas de replantación la misma se realiza dentro de dicho año.

Para el cálculo del volumen de madera esperado para las alternativas de manejo de rebrotes, se partió del IMA promedio de las 15 parcelas de Jeeralang del presente estudio (19,1 m³/ha/año), el cual se multiplicó por la supervivencia media de cepas de dichas parcelas (93,2%). Dado que las plantaciones estudiadas no sufrieron daños por *Teratosphaeria nubilosa* en la primera rotación (porque el patógeno no estaba presente en la etapa susceptible del huésped), se consideró una disminución del crecimiento debido a este patógeno en la segunda rotación de 10 y 20% en las alternativas con aplicación y sin aplicación de fungicidas, respectivamente. Adicionalmente, en ambos casos se asumió una mortalidad de 15% durante la segunda rotación, porcentaje promedio según la experiencia de los productores (Alberto Rodríguez com. pers.). La productividad de las alternativas de replantación con *E. smithii* y *E. dunnii* (IMA de 22 m³/ha/año), también fue aportada por las empresas participantes. El mismo IMA se utilizó para la alternativa de replantación con clones de *E. globulus*, dado que esa es la productividad esperada por ser clones seleccionados.

El valor de venta de la madera varía según la especie, destino final y en función de los diferentes acuerdos establecidos entre productores e industria. El precio de mercado para *E. globulus* es de 63 USD/m³, para *E. smithii* no se cuenta con precio de mercado por lo que se utilizó el precio esperado por las empresas, que es el mismo que para *E. globulus* (Alberto Rodríguez, com. pers.) y para *E. dunnii*, el cual tampoco presenta un precio de mercado y depende de las diferentes negociaciones entre

productor - planta y las necesidades de la misma, se utilizó 62 USD/m³, precio promedio de compra que manejan en planta (Diego Carrau, com. pers.)

Según FAO (1980), en el análisis económico de proyectos forestales, cuyos activos presentan una vida más larga que el período de análisis, se debe considerar el “valor residual”. Para todas las alternativas se consideró que al final del ciclo existe la posibilidad de una nueva rotación mediante rebrotes. Por lo tanto, se estimó el valor residual para cada alternativa como el ingreso neto descontado de una nueva rotación por manejo de rebrotes, con una disminución en el IMA del 20 y 30% para las alternativas de replantación y manejo de rebrotes, respectivamente. En ambos casos, se consideró como costos de esa nueva rotación a los costos de la alternativa de manejo de rebrotes sin aplicación de fungicidas.

Los datos para la construcción de los flujos de fondos, es decir, el volumen esperado para cada alternativa, los costos y los precios, fueron obtenidos mediante encuestas a los referentes de las empresas participantes y los momentos en que aplica cada uno se obtuvieron de los planes de manejo aplicados por las empresas en cada alternativa. Cuando se contaba con más de un valor, se tomó el promedio. Los costos utilizados para las diferentes alternativas, así como el año de realización de los mismos, se presentan en el Cuadro 6. Todos los valores son expresados en dólares americanos por hectárea efectiva.

La actualización de los flujos de ingresos netos fue realizada usando una tasa de interés del 8%. En Uruguay normalmente se utiliza una tasa de interés entre el 6 y el 8% para evaluar proyectos de inversión; se decidió usar una tasa de 8%, para que el análisis económico sea más exigente.

Para el análisis de sensibilidad, es decir, para analizar el efecto de variaciones en la productividad, el IMA se modificó en 10 y 20%; para variaciones en el precio de venta de la madera en 5 y 10%; para variaciones en el flete hasta el punto de venta en 50 y 100 km. Finalmente, para analizar el efecto del costo de oportunidad, la tasa de interés se modificó a 6 y 10%.

Cuadro 6. Costo de diferentes actividades y año de implementación.

Alternativas manejo de rebrotes	Costo (USD/ha)	Año de implementación
Control de hormiga y destape de cepas	130	0
Aplicación de fungicida	120	1 y 2
Raleo de rebrotes	150	3

Alternativas de replantación	Costo (USD/ha)	Año de implementación
Plantación con <i>E. smithii</i>	1250	0
Plantación con <i>E. dunnii</i>	1200	0
Plantación con <i>E. globulus</i> clonal	1500	0
Control de maleza y hormigas	200	1
IRAE	25% valor en pie	11

Todas las alternativas	Costo (USD/ha)	Año de implementación
Caminería	150	11
Administración	30	Anual
Contribución Inmobiliaria, Patrimonio, Sobretasa de Patrimonio	10	Anual
Impuesto INIA	0,4% valor en pie	11
Cosecha y carga	Costo USD/m ³	11
	Hasta 145 m ³ /ha	21
	146 a 165 m ³ /ha	20
	166 a 180 m ³ /ha	19
	Mayor a 180 m ³ /ha	17
Flete	Costo USD/m ³ /km	11
	0 a 200 km	0,084
	Mayor a 200 km	0,066

2.3 HERRAMIENTA DE APOYO A LA GESTIÓN

Se diseñó una planilla en el software Microsoft Excel para ser utilizada como herramienta de apoyo a la gestión forestal, es decir, que oriente al productor en la toma de decisiones. Se anidaron los resultados del modelo de predicción de porcentaje de rebrote a nivel de parcela y el análisis económico para las diferentes alternativas.

Para el cálculo de porcentaje de rebrotes se utilizó el modelo a nivel de parcela por ser el que estima de manera más sencilla la probabilidad de rebrote del área de estudio. Se utilizaron diferentes hojas de cálculo para los diferentes análisis. En una primera instancia, una hoja de ingreso de datos relevados a campo, donde se aplicaron fórmulas para los diferentes cálculos necesarios para la estimación del volumen esperado en una segunda rotación según el modelo. Se ingreso la ecuación resultante del modelo mediante funciones SI de Excel, que verificaron a través de pasos consecutivos el cumplimiento de las diferentes condiciones posibles para los cálculos de probabilidad de rebrote. En las hojas siguientes se diseñaron flujos de fondos para un ciclo de 11 años, donde ingresando los datos de costos e ingresos y mediante la fórmula de VAN y TIR que proporciona el Excel se autogeneran los resultados.

Mediante dicha planilla el productor puede calcular el resultado económico de diferentes alternativas utilizando información propia, tanto de la productividad y estado sanitario de sus montes previo a la cosecha, como de los costos y precios que considere más apropiados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A los 8 meses postcosecha, el promedio general de cepas rebrotadas fue de 85,9% de todos los árboles estudiados. La parcela con mayor rebrote tuvo un 100% de cepas rebrotadas y la parcela con menor rebrote un 41,2%, con un promedio a nivel de parcelas de 85,4%. Estos porcentajes de rebrote son similares a los reportados por Balmelli y Resquín (2005), Whittock *et. al.*, (2003) y Prado *et. al.*, (1990), los cuales varían entre 62,5 y 93%, y son mayores que los reportados por Alonso *et. al.*, (2012), quienes registraron un porcentaje de rebrote de solo el 15% (aunque dicho estudio fue realizado en Río Negro, zona donde *E. globulus* presenta muy pobre adaptación).

El análisis estadístico dentro de cada variable reveló que existen diferencias significativas en el porcentaje de rebrote de cepas para todas las variables estudiadas, excepto para el manejo de residuos y para la presencia de *Inocutis jamaicensis* (Cuadro 7). El material genético que presentó mayor porcentaje de rebrote fue la semilla Jeeralang, con un 93,2%, y el que presentó menor rebrote fue la semilla Yeodene, con 68,8%. La cosecha con Harvester presentó mayor porcentaje de rebrote de cepas que la cosecha con Feller. Los árboles sin canchros, brotes epicórmicos o muerte apical presentaron mayor porcentaje de rebrote que los árboles con presencia de dichos problemas sanitarios.

Como se mencionó en los materiales y métodos, para el ajuste del modelo predictivo a nivel de parcela, el efecto del DAP sobre el rebrote de cepas fue analizado como la proporción de árboles mayores a determinado valor que divide el set de datos en dos grupos más homogéneos. Dicho valor fue de 14 cm, existiendo diferencias significativas entre ambos grupos de árboles, siendo el grupo con mayor DAP el que presentó mayor porcentaje de rebrote.

Cuadro 7. Supervivencia de cepas para cada variable analizada y significancia estadística dentro de cada variable.

	Rebote de cepa		Total	% de rebrotes	<i>p-valor</i>	Tukey
	No	Si				
Fuente de semilla					$2,2e^{-16}$	
Clon	39	472	511	92,4%		b
Madalya	68	189	257	73,5%		c
Jeeralang	92	1284	1378	93,2%		a
Salus	120	319	439	72,7%		d
Yeodene	83	183	266	68,8%		e
DAP					$<2,2e^{-16}$	
DAP <14 cm	165	457	622	73,5%		b
DAP >14 cm	237	1990	2227	89,35%		a
Maquinaria de cosecha (*)					$3,2e^{-15}$	
Harvester	36	444	480	92,5%		a
Feller	123	347	470	73,8%		b
Manejo de residuos (*)					0,86	
Si	31	504	535	96%		n/a
No	29	493	522	94%		n/a
Inocutis jamaicensis					0,08	
Si	51	239	290	82,4%		n/a
No	351	2208	2559	86,3%		n/a
Brotos epicórmicos					$2,2e^{-16}$	
Si	123	186	309	60,2%		b
No	279	2261	2540	89,0%		a

Cuadro 7. Continuación

	Rebrote de cepa		Total	% de rebrotes	<i>p</i> -valor	Tukey
	No	Si				
Cancros					1,37e ⁻⁰⁹	
Si	57	128	185	69,2%		b
No	345	2319	2664	87,0%		a
Muerte Apical					<2,2e ⁻¹⁶	
Si	96	69	165	41,8%		b
No	306	2378	2684	88,6%		a

(*) Los datos corresponden a parcelas apareadas. Diferentes letras dentro de cada variable indican diferencias significativas por el test de Tukey.

3.1 MODELO PREDICTIVO A NIVEL DE CEPA

El modelo con mejor ajuste presentó un valor Akaike de 1880 y las variables incluidas en el modelo fueron: el material genético, el DAP, la presencia de cancros, la presencia de muerte apical y el tipo de maquinaria de cosecha y no incluyó al manejo de los residuos, la presencia de *Inocutis jamaicensis* y la presencia de brotes epicórmicos.

El modelo de predicción de probabilidad de rebrote de cepa individual resultante

$$g(x) = \ln \left[\frac{\pi(x)}{1-\pi(x)} \right] = 0,44 + 1,65 (Cosecha Harvester) - 0,81 (Jeeralang) - 2,26 (Madalya) - 1,39 (Salus) - 2,64 (Yeodene) - 0,80 (Cancros) - 1,20 (Muerte apical) + 0,08 (DAP)$$

Presentaron signo positivo los coeficientes de cosecha con Harvester y del DAP, indicando que estas variables aumentan la probabilidad del rebrote de cepa. Por el contrario, presentaron signo negativo los coeficientes para los diferentes orígenes de la semilla, es decir, el uso de estas fuentes de semilla disminuye la probabilidad del rebrote en comparación con el origen clonal. También presentaron signo negativo los coeficientes para la presencia de canchros y la presencia de muerte apical, indicando que estos problemas sanitarios también disminuyen la probabilidad de rebrote (Cuadro 8).

Cuadro 8. Coeficientes, error estándar y significancia de las variables incluidas en el modelo predictivo de probabilidad de rebrote a nivel de cepa individual.

Coeficiente	B	Error estándar	Significancia
Intercepto	0,44	0,28	0,11
Origen Jeeralang	- 0,81	0,26	0,0024
Origen Salus	- 1,39	0,21	6,93e ⁻¹¹
Origen Madalya	- 2,26	0,30	5,12e ⁻¹⁴
Origen Yeodene	- 2,64	0,29	< 2e ⁻¹⁶
Cosecha Harvester	1,65	0,21	4,64e ⁻¹⁴
DAP	0,08	0,01	1,96e ⁻¹¹
Canchros	- 0,80	0,19	3,87e ⁻⁰⁵
Muerte apical	- 1,20	0,20	4,82e ⁻⁰⁹

La prueba de Hosmer y Lemeshow fue no significativa, con un Chi cuadrado de 7,03 y un p-valor de 0,53, indicando que no existen diferencias significativas entre valores observados y valores estimados, es decir, que el modelo predice adecuadamente el rebrote o no de cada cepa.

La capacidad discriminativa del modelo para determinar si una cepa rebrota o no rebrota fue aceptable, ya que la curva ROC presentó un área bajo la curva de 0,797 (IC 95% 0,773-0,822). El punto de corte con mayor poder discriminativo, es decir, la probabilidad de rebrote que mejor detecta si la cepa rebrota o no, fue de 0,835, con una sensibilidad del 82% (IC 95% 80-83%) y especificidad del 64% (IC 95% 59-69%). Esto indica que el modelo ajustado presenta una alta probabilidad de obtener un verdadero positivo y una probabilidad media de obtener un verdadero negativo (Figura 4). El valor predictivo negativo fue del 37%, y el valor predictivo positivo fue de 93,3% (Cuadro 9).

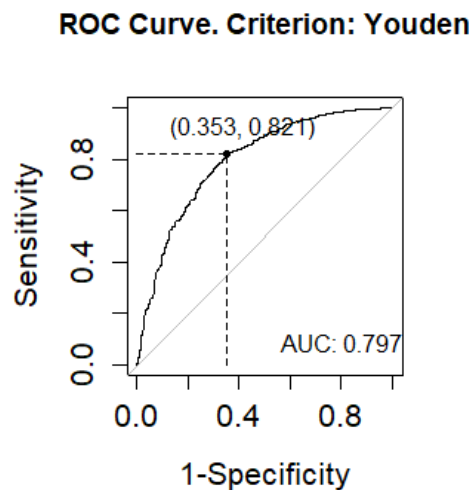


Figura 4. Gráfico de curva ROC del modelo a nivel de cepa como prueba diagnóstica para el rebrote.

Cuadro 9. Tabla de contingencia a partil del umbral de clasificación.

Observados		Predichos	
		Rebrota	No rebrota
Rebrota		2009 (VP)	438 (FN)
No rebrota		143 (FP)	259 (VN)

VP verdaderos positivos, VN verdaderos negativos, FP falsos positivos y FN falsos negativos

Mediante el análisis gráfico de los residuos se observó que no hay datos con comportamientos anómalos, es decir, ningún dato fuera del rango -3 y 3 en el gráfico de residuos versus el predictor lineal (Figura 5).

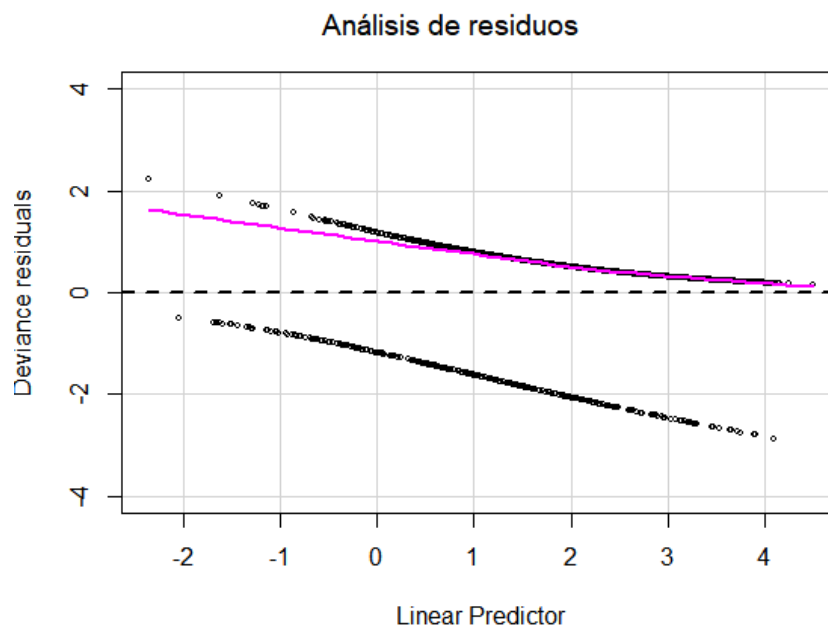


Figura 5. Análisis de residuos vs predictor lineal.

3.2 MODELO PREDICTIVO A NIVEL PARCELA

De los factores estudiados, el origen del material, la proporción de árboles con DAP > 14 cm, la proporción de árboles con canchales y el tipo de maquinaria de cosecha utilizada fueron identificados como significativos a nivel de parcela e incluidos en el modelo predictivo.

El modelo con mejor ajuste según el criterio de Akaike presentó un valor de 202,4. El ajuste general del modelo medido por el Pseudo R² de Mc-Fadden fue de 0,622, valor por encima del rango de buen ajuste sugerido por Louviere *et. al.*, (2000).

La devianza del modelo ajustado fue de 65,53 con un p-valor $5,55e^{-16}$, es decir, las variables ingresadas al modelo, tomadas en su conjunto, contribuyen efectivamente a explicar las variaciones en la probabilidad del rebrote.

El modelo de predicción de porcentaje de rebrote a nivel de parcela resultó:

$$g(x) = \ln \left[\frac{\pi(x)}{1-\pi(x)} \right] = -2,10 + 1,51 (\text{Cosecha Harvester}) - 0,07 (\text{Jeeralang}) - 1,60 (\text{Madalya}) - 0,66 (\text{Salus}) - 2,4 (\text{Yeodene}) - 3,27 (\text{Prop. de árboles con canchros}) + 4,67 (\text{Prop. de árboles con DAP} > 14 \text{ cm})$$

En el modelo ajustado podemos observar que el signo de los coeficientes de algunas variables (cosecha con Harvester y proporción de árboles con DAP > 14 cm) fue positivo, indicando que la variable aumenta la probabilidad del rebrote de cepas a nivel de parcelas, y que el de otras variables (origen de la semilla y proporción de árboles con canchros) fue negativo, indicando que las mismas disminuyen la probabilidad de rebrote (Cuadro 10).

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Whittcock *et. al.*, (2003), quienes reportan diferencias significativas entre subrazas de *E. globulus* en sobrevivencia de cepas. En el presente estudio, los rodales de semilla de origen Jeeralang fueron los que presentaron mayor porcentaje de rebrote, lo que podría estar explicado por un buen estado sanitario y por el hecho de que ninguna parcela de Jeeralang fue cosechada con Feller. El mismo estudio de Whittcok *et. al.*, (2003) evidencia que la presencia de rebrote está correlacionada significativamente con el DAP previo a la cosecha, lo cual también es consistente con nuestros resultados, donde la proporción de árboles con DAP mayor a 14 aumentó la probabilidad de rebrotos a nivel de parcela.

Cuadro 10. Coeficientes, error estándar y significancia de las variables incluidas en el modelo predictivo a nivel de parcela.

Coeficiente	β	Error estándar	Significancia
Intercepto	-2,10	1,02	0,039
Origen Jeeralang	- 0,07	0,32	0,82
Origen Salus	- 0,66	0,32	0,04
Origen Madalya	- 1,60	0,35	6,29e ⁻⁰⁶
Origen Yeodene	- 2,40	0,29	3,57e ⁻¹⁶
Cosecha Harvester	1,51	0,20	5,03e ⁻¹³
Proporción de DAP mayor a 14 cm	4,67	1,16	5,99e ⁻⁰⁵
Proporción Cancros	- 3,27	1,30	0,012

Camargo *et. al.*, (1997) observaron que, a mayor daño en la corteza, simulando los posibles daños de la maquinaria de cosecha, disminuía sensiblemente la sobrevivencia y el número de rebrotes. Esto concuerda con el estudio de Alonso *et. al.*, (2012) quienes reportaron que, a mayor desprendimiento de corteza, menor porcentaje de rebrote. El presente estudio mostró diferencias entre las maquinarias utilizada en la cosecha, siendo la realizada con Harvester la que logra mayor porcentaje de rebrotes. Estas diferencias podrían deberse a la metodología de corte, ya que el Harvester presenta un corte más limpio, sin desgarrar de fibras y menor daño a la corteza que el Feller.

No se encontraron diferencias significativas entre el destape o no de las cepas luego de la cosecha, por lo que el modelo ajustado no incluyó esta variable. Estos resultados son similares a los obtenidos por Camargo *et. al.*, (1997) y diferentes a los

obtenidos por Klein *et. al.*, (1997), quienes reportaron que el manejo de residuos aumentó en un 24% la supervivencia de las cepas de *E. grandis* y *E. saligna*. Cabe aclarar que el manejo de residuos que se analizó en la presente investigación es el utilizado comercialmente y que el mismo no equivale a un destape real de las cepas, sino a un despeje de las ramas de la cabeza del tocón.

De las enfermedades fustales analizadas, el modelo ajustado solamente incluyó como variable explicativa la proporción de árboles con canchros; que afecta negativamente la probabilidad de rebrote de la parcela. Esto concuerda con lo observado por Balmelli y Resquín (2005), quienes reportaron que a mayor incidencia de canchros mayor mortandad de cepas y que la podredumbre blanca no afecta la capacidad de rebrotes. Los mismos autores observaron que la presencia de brotes epicórmicos también afectaba la capacidad de rebrotes, pero en este trabajo dicha variable no integró la lista de variables seleccionadas para predecir la capacidad de rebrotes. A diferencia del modelo de cepa individual, el modelo de parcela no incluye como variable explicativa la presencia de muerte apical, lo cual podría estar indicando que su efecto se diluye al analizarla como proporción de árboles con muerte apical y/o que dicha variable está correlacionada con la presencia de canchros.

Mediante el análisis gráfico de los residuos se observó que hay dos datos fuera del rango -3 y 3 en el gráfico de residuos vs el predictor lineal (Figura 6a) pero ningún valor con distancia de Cook mayor a 1, por lo cual no son datos influyentes para ninguna variable y se mantienen en el análisis.

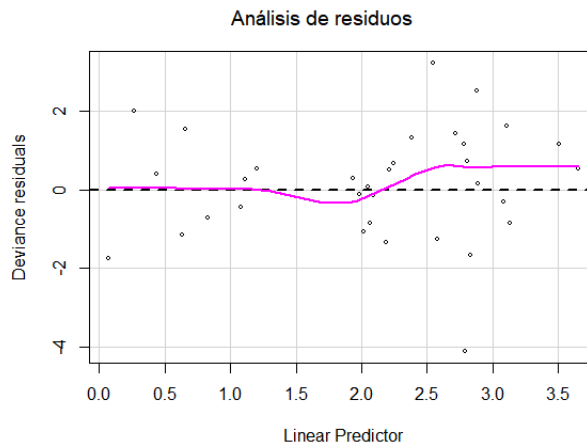


Figura 6. Análisis de los residuos vs predictor lineal.

Se debe considerar que ambos modelos predictivos resultantes del presente estudio no fueron validados, principalmente debido al reducido número de datos, que exigió que todos fueran incluidos para el ajuste del modelo. Por tal motivo, sería conveniente su validación mediante la toma de datos en nuevas plantaciones de *E. globulus* próximas a ser cosechadas, la aplicación de los modelos y la comparación de los resultados (valores predichos) con los valores observados (% de rebrote real).

También es necesario mencionar que este estudio, por estar acotado a la duración de un grado de Maestría, se basa en datos de un único año y una única época de cosecha. El análisis de un solo año también limitó la disponibilidad de plantaciones a ser relevadas, lo cual acotó la variabilidad en productividad y estado sanitario de las mismas. Por todo lo anterior, se sugiere como investigación futura, repetir la toma de datos en diferentes años y en diferentes épocas de cosecha y volver a ajustar los modelos.

3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

3.3.1 Escenario base

Todas las alternativas analizadas presentaron VANs positivos y TIRs mayores a la tasa de descuento propuesta, indicando que son económicamente rentables

(Cuadro 11). Las mejores alternativas, en base a la TIR, son las que tienen una baja inversión inicial, es decir, el manejo de rebrotes sin aplicación de fungicidas, seguida del manejo de rebrotes con fungicidas. Sin embargo, cuando se comparan las diferentes alternativas en base al VAN, la más rentable es el manejo de rebrotes con fungicidas, seguida de la replantación con *E. smithii*. El hecho de que el resultado económico esperado para la replantación con *E. smithii*, aún con los altos costos iniciales que tiene, supere al del manejo de rebrotes sin aplicación de fungicidas se debe a su mayor productividad (22 m³/ha/año versus 12,1 m³/ha/año). En otras palabras, los mayores ingresos por venta de madera que se obtienen con *E. smithii* compensan los costos de replantación.

Por otra parte, dado que el destape de cepas tiene un costo importante (aproximadamente USD 100/ha) y que, como se vio anteriormente, no aumenta la probabilidad de rebrote, es esperable que deje de realizarse. Si en el análisis económico de las alternativas de manejo de rebrotes no se incluye el costo del destape de cepas, su rentabilidad aumenta (el VAN para la alternativa sin uso de fungicidas sería de 1217 USD/ha y con uso de fungicidas de 1313 USD/ha), superando en ambos casos la rentabilidad esperada para la replantación con *E. smithii*.

La alternativa de manejo de plantación con *E. dunnii* es la que presenta los menores valores de VAN y TIR. Esto se debe principalmente a que la madera de esta especie no tiene mercado externo, su punto de venta es Montevideo, por lo que debe transportarse hasta Conchillas, que se encuentra en promedio a 360 km de distancia, lo que hace que el costo de transporte sea un 57% mayor que el de las otras alternativas. La replantación con *E. smithii* presenta mayor VAN que la replantación con clones de *E. globulus*, lo que se explica por el mayor costo de implantación de los clones, ya que es la única diferencia entre el flujo de fondos de ambas especies. Para compensar los mayores costos de implantación, es decir, para alcanzar una rentabilidad similar a la esperada con *E. smithii*, la replantación con clones debería tener una producción de madera 4% superior a la utilizada en el escenario base. Si bien de las alternativas de replantación la de *E. dunnii* es la menos rentable, hoy en día se puede considerar la menos riesgosa ya que actualmente no hay disponibilidad de clones de *E. globulus* de

alta productividad y tanto la posibilidad de exportar como el precio de la madera de *E. smithii* aún no han sido confirmados con la exportación de volúmenes importantes.

La principal desventaja que se le atribuye a las alternativas de replantación en comparación con el manejo tallar, son los altos costos de implantación del cultivo (preparación de suelos, plantines, plantación, etc.). Además, para nuestro país, el impuesto a la renta de actividades económicas (IRAE) es otra de las desventajas que presentan las alternativas de replantación. A partir del 2007 queda sin efecto la exoneración del IRAE para nuevos bosques de rendimiento, pero se mantiene para el manejo de rebrotes de plantaciones instaladas previo a dicha fecha, por lo cual este tributo (que representa el 25% del valor de la madera en pie) pasa a tener un peso importante al momento de decidir entre replantar y realizar manejo de rebrotes.

Cuadro 11. Indicadores económicos esperados para las diferentes alternativas analizadas.

Alternativa de manejo	VAN (USD/ha)	TIR
Manejo rebrotes sin fungicidas	1074	22,6%
Manejo rebrotes con fungicidas	1170	20,0%
Replantación con <i>E. smithii</i>	1110	13,3%
Replantación con <i>E. dunnii</i>	158	9,0%
Replantación de clones <i>E. globulus</i>	860	11,8%

3.3.2 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad muestra que la mayoría de las alternativas siguen siendo económicamente rentables en cada una de las variaciones propuestas para los factores con más peso en el resultado económico. Las únicas excepciones, es decir,

situaciones que presentaron VANs negativos, fueron para la alternativa de replantación con *E. dunnii* si el IMA es un 10 o 20% menor, el valor de venta de la madera es un 5 o 10% menor o el punto de venta de la madera se encuentra a 50 o 100 km más lejos, que en el escenario base (Figuras 7, 8 y 9).

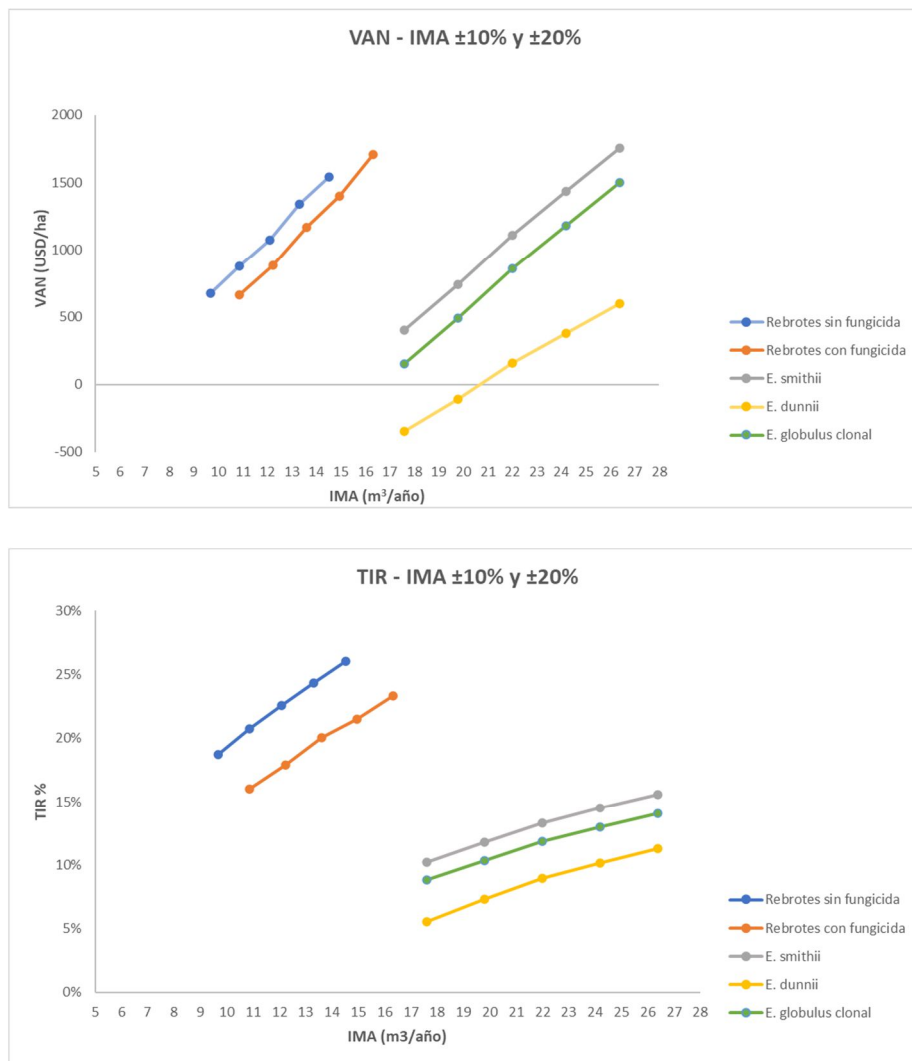


Figura 7. Análisis de sensibilidad para el IMA de las cinco alternativas para una segunda rotación.

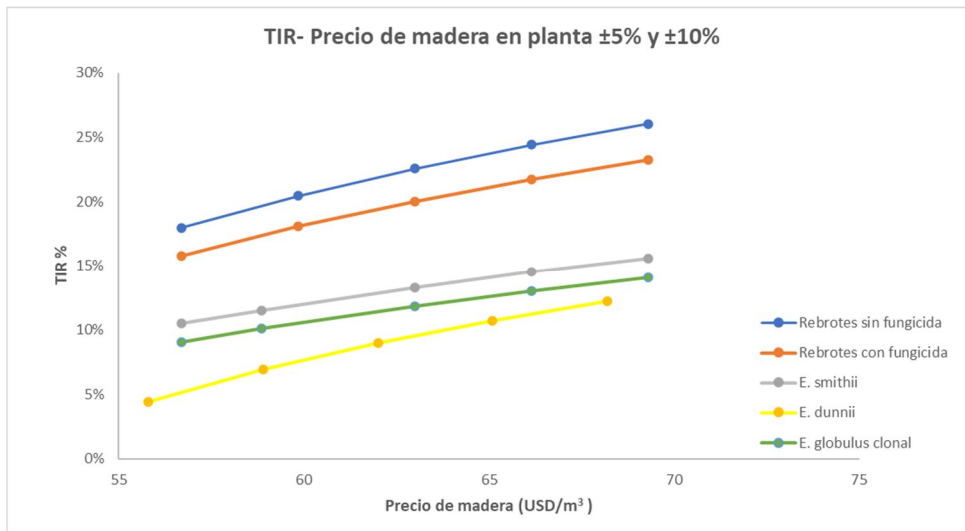
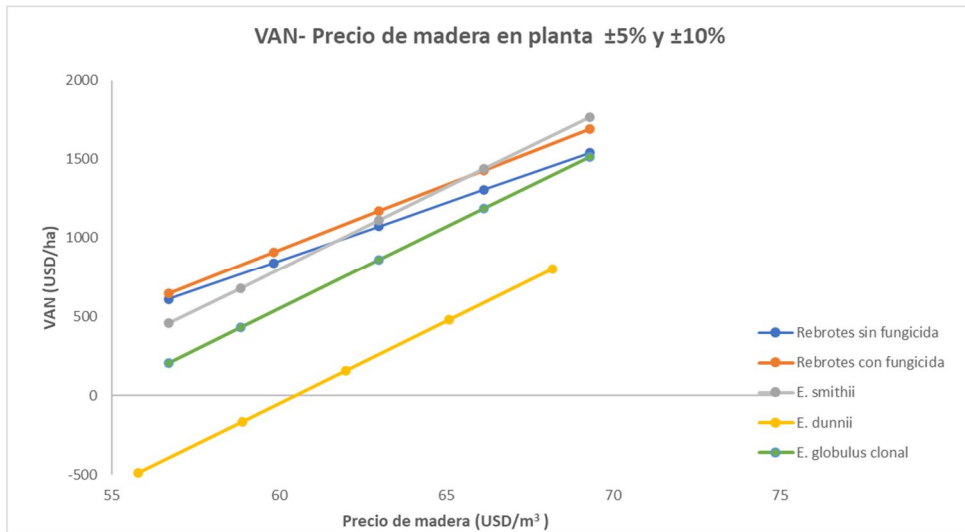


Figura 8. Análisis de sensibilidad para el precio de madera de las cinco alternativas para una segunda rotación.

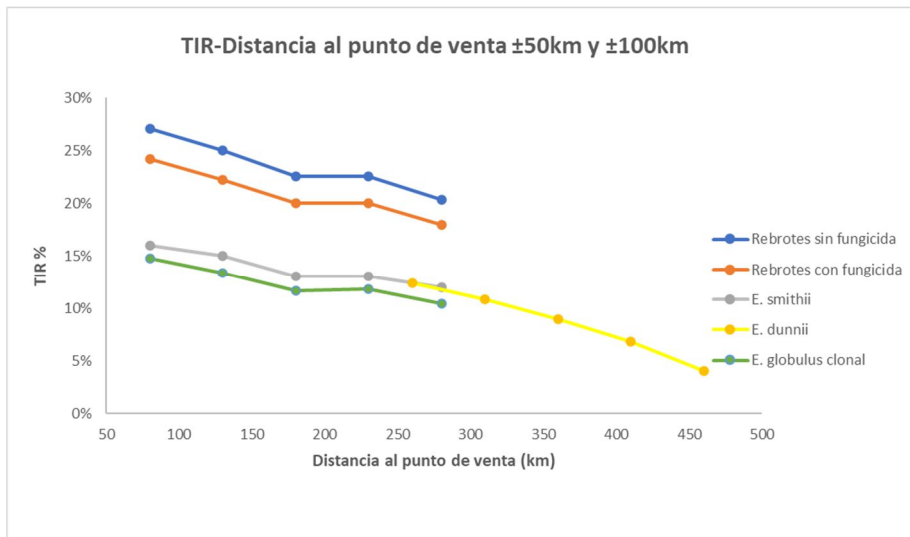
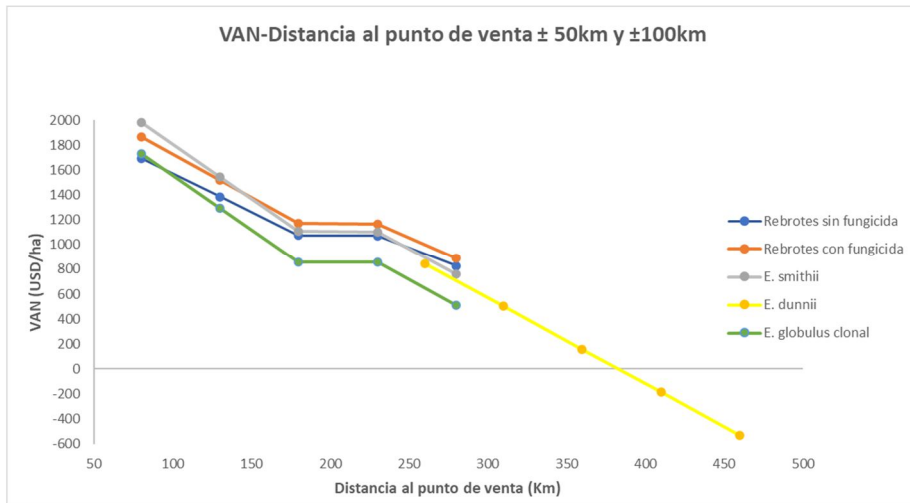


Figura 9. Análisis de sensibilidad para la distancia al punto de venta de las cinco alternativas para una segunda rotación.

El análisis de sensibilidad para la tasa de descuento mostró que, en los porcentajes de variación propuestos, el VAN de las diferentes alternativas continúa siendo positivo para todos los casos, a excepción de la replantación con *E. dunnii*, que con una tasa de descuento del 10% presenta un VAN negativo (Cuadro 12). Por otro lado, al cambiar la tasa de descuento cambia la rentabilidad relativa de las diferentes alternativas. Para una tasa de descuento del 6%, la alternativa de replantación con *E. smithii* es la más rentable, seguida del manejo de rebrotos con fungicida y en tercer

lugar la replantación clonal. En cambio, para una tasa de 10%, el manejo de rebrotes con fungicida es la alternativa más rentable y le sigue el manejo de rebrotes sin fungicida y luego la replantación con *E. smithii*.

Cuadro 12. Análisis de sensibilidad para la tasa de descuento.

Tasa de descuento	VAN USD/ha				
	Rebrotes s/f	Rebrotes c/f	<i>E. smithii</i>	<i>E. dunnii</i>	Clon <i>E. globulus</i>
6%	1515	1692	1936	683	1686
8%	1074	1170	1110	158	860
10%	752	789	507	-224	257

s/f sin aplicación de fungicida, c/f con aplicación de fungicida.

El análisis de sensibilidad también permite comparar la rentabilidad ante cambios de escenario que afecten al sector (como por ejemplo una reducción en el precio internacional de la celulosa) y que por lo tanto afecten por igual a las diferentes alternativas evaluadas. Si se evalúa la rentabilidad de las diferentes alternativas, en los cuatro escenarios planteados para el precio de la madera, es decir un cambio en más o menos 5 y 10% del precio base, el ranking de rentabilidad cambia. Para el escenario base y los escenarios desfavorables, el manejo de rebrotes con aplicación de fungicida, es la alternativa más rentable. En cambio, en los escenarios favorables (aumento en el precio de venta), la alternativa más rentable pasa a ser la replantación con *E. smithii*.

De igual forma, el análisis de sensibilidad permite comparar la rentabilidad de situaciones particulares, como por ejemplo para una zona de suelos más pobres o con distancias de flete mayores que las utilizadas en el escenario base, situaciones muy factibles, dado que los IMA base establecidos son muy buenos y la distancia base es un promedio entre las zonas de estudio y los puntos de venta. El análisis económico

para sitios menos productivos (disminución del IMA de un 10 y 20%), o más alejados del punto de venta (aumento del flete de 50 y 100 km), muestra que el manejo de rebrotes con aplicación de fungicida es también la alternativa más rentable.

En el Cuadro 13 se presentan los puntos de equilibrio (situaciones en que el VAN se iguala a 0 y el proyecto no genera ganancias ni pérdidas) para el IMA, el precio de madera y la distancia al punto de venta en cada alternativa. Las alternativas de manejo de rebrotes, con y sin fungicidas, podrían tener rentabilidad positiva aún si su IMA fuese, respectivamente, 6,86 y 5,56 m³/ha/año y las alternativas de replantación aun tendrían rentabilidad positiva si su IMA fuese 15,67 m³/ha/año para *E. smithii*, 20,45 m³/ha/año para *E. dunnii* y 16,51 m³/ha/año para *E. globulus* clonal. Considerando el precio de venta de la madera, las alternativas de manejo de rebrote pueden disminuir el precio de venta hasta 48,47 USD/m³ (sin fungicida) y hasta 48,92 USD/m³ (con aplicación de fungicida). De las alternativas de replantación, la replantación con *E. dunnii* es la que presenta mayor riesgo, ya que si el precio de la madera no llega a los 60,48 USD/m³ la rentabilidad es negativa. Para la alternativa de *E. smithii* el precio puede disminuir hasta 52,32 USD/m³ y para *E. globulus* clonal hasta 54,73 USD/m³. Con respecto a la distancia, el manejo de rebrotes permite alejarse del punto de venta en aproximadamente 260 km y seguir siendo rentable. De las alternativas de replantación, *E. dunnii* es la que presenta menor margen, ya que si la distancia al punto de venta aumenta en más de 23 km (en comparación al escenario base), la alternativa pasa a tener un VAN negativo y deja de ser rentable financieramente. En resumen, las alternativas de manejo de rebrotes presentan menores riesgos, es decir, soportan mayores variaciones de costos y precios, que las alternativas de replantación.

Cuadro 13. Valores de IMA, precio de madera y distancia de venta que determinan el punto de equilibrio (VAN=0) en cada alternativa.

Variable	Rebrotos s/f	Rebrotos c/f	<i>E. smithii</i>	<i>E. dunnii</i>	Clon <i>E. globulus</i>
IMA m ³ /ha/año	5,56	6,86	15,67	20,45	16,51
Precio USD/m ³	48,47	48,92	52,32	60,48	54,73
Distancia Km	449,3	442,5	390,8	383	354,5

El análisis económico requiere algunas consideraciones, relacionadas a la incertidumbre en variables importantes, como la productividad esperada en las diferentes alternativas y el precio de venta de algunas especies. Con respecto a la productividad esperada, aún existe poca información, tanto para *E. dunnii* y *E. smithii* (por ser especies relativamente nuevas en la región sureste) como para el manejo de rebrotos de *E. globulus*. En este último caso, la incertidumbre radica en varios factores que determinan el IMA en la segunda rotación, como la tasa de crecimiento de cada cepa, el efecto sobre el crecimiento debido a *T. nubilosa* (que no estaba presente en la primera rotación) y la tasa de mortalidad durante la segunda rotación. Con respecto al precio de venta de la madera, que de por sí es incierto por el largo del ciclo, la mayor incertidumbre se da en *E. smithii*, ya que aún no está comprobada la existencia del mercado externo. Si esta especie no pudiese exportarse, la rentabilidad de las plantaciones se vería seriamente afectada, principalmente porque los costos de flete se incrementarían marcadamente. La mayor parte de las limitantes mencionadas se irán levantando a medida que la investigación y/o el propio sector generen más información.

3.4 HERRAMIENTA DE APOYO A LA GESTIÓN

En esta herramienta se integraron los resultados obtenidos en el ajuste del modelo de rebrotos a nivel de parcela y la metodología para las evaluaciones financieras en una planilla Excel. A partir de datos de campo sobre la plantación en

pie e información sobre costos y precios de venta, se obtienen los indicadores económicos VAN y TIR para las alternativas de manejo de rebrotes de una segunda rotación. También permite realizar la evaluación económica para alternativas de replantación con diferentes especies.

El aplicativo Excel cuenta con 7 hojas con los siguientes nombres, CÁLCULOS PREVIOS (Manejo de rebrotes), VAN TIR alt1, VAN TIR alt2, VAN TIR alt3, VAN TIR alt4, VAN TIR alt5 y RESUMEN. La hoja CÁLCULOS PREVIOS permite estimar la probabilidad de rebrote de cepas esperado y el IMA esperado en las alternativas de manejo de rebrotes. A partir de datos de DAP, Altura y presencia o ausencia de canchros (ingresando 1 para presencia y 0 para ausencia) de todos los árboles relevados en parcelas de 1000 m², la planilla autogenera el número de árboles por hectárea a la cosecha, el área basal, la altura media dominante, el volumen por hectárea (estimado por fórmula de Hirigoyen, 2016) y el IMA (el productor debe ingresar la edad de la plantación). También genera la proporción de árboles con DAP mayor a 14 cm y la proporción de árboles con presencia de canchros; datos necesarios para los siguientes cálculos. Finalmente calcula la probabilidad de rebrotes esperado para dicha parcela y el IMA esperado en la segunda rotación. Para la estimación de la probabilidad de rebrotes, el usuario debe de seleccionar de una lista de opciones, el material genético de la plantación (Clon, Jeeralang, Madalya, Salus y Yeodene) y la maquinaria de cosecha que se prevea utilizar (Harvester o Feller). Para el cálculo del IMA esperado del manejo de rebrotes, el usuario debe ingresar un estimado de disminución del crecimiento por *T. nubilosa* y un estimado de mortalidad durante la segunda rotación. En la propia planilla se sugiere una disminución por *T. nubilosa* de 0,20 o 0,10 (20% o 10%), para manejo sin aplicación de fungicida y con aplicación, respectivamente, y una mortalidad de 0,15 (15%).

Las siguientes hojas del libro, VAN TIR alt1, VAN TIR alt2, VAN TIR alt3, VAN TIR alt4, VAN TIR alt5, presentan el mismo formato y calculan el VAN y el TIR de una segunda rotación para la alternativa considerada, con la misma metodología y supuestos sobre costos e ingresos que se aplicó en el análisis económico de la presente tesis. El usuario debe ingresar: el tipo de alternativa (Rebrote o

replantación), la especie, el costo de oportunidad (tasa de descuento), el costo de cosecha y carga (USD/m³), el costo del flete (USD/m³/km) y la distancia al punto de venta de la madera (km) y el precio de venta de la madera (USD/m³). También debe ingresar el IMA esperado en la alternativa considerada (para manejo de rebrotes el IMA esperado se obtuvo en la hoja CÁLCULOS PREVIOS). En el esquema de flujo de fondos, debe ingresar los costos (USD/ha efectiva) de instalación y manejo, administración, caminería e impuestos generales, en el año en que se ejecuta cada uno de ellos. La planilla autogenera los costos de cosecha y carga, flete, IRAE (si corresponde) y adicional INIA. También autogenera los ingresos por la venta de madera y el valor residual. Finalmente brinda el resultado de VAN y TIR para la alternativa analizada. La hoja final, RESUMEN, simplemente presenta un resumen de los indicadores económicos de cada una de las alternativas analizadas para facilitar su comparación.

En base a una situación hipotética (plantación de *E. globulus* próxima a cosecha), se mostrará a continuación la utilidad de la herramienta para decidir el tipo de cosechadora a utilizar y la conveniencia de realizar manejo de rebrotes o de replantar con *E. smithii*. Como se mencionó anteriormente, el primer paso es tomar datos en una parcela de 1000 m² y completar la planilla con la información requerida. Supongamos que esto arroja los siguientes resultados: 970 árboles por hectárea, una proporción de árboles con DAP > a 14 cm de 0,84, una proporción de árboles con presencia de canchales de 0,19 y un IMA de 17,37 m³/ha/año. Supongamos también que la plantación es de origen Jeeralang y que puede cosecharse con Harvester o con Feller. La herramienta nos muestra que si se cosechara con Harvester la probabilidad de rebrote es de 93% y si se cosechara con Feller es de 75%. Si se asume que en una segunda rotación por manejo de rebrotes habrá una mortandad de un 15% y una disminución en la productividad por *T. nubilosa* de un 10% (dado que se aplicará fungicida), la herramienta nos muestra que el IMA esperado en la segunda rotación es de 12,39 m³/ha/año si se cosecha con Harvester y de 10,01 m³/ha/año si se cosecha con Feller. En la siguiente hoja (VAN TIR alt1), supondremos una tasa de interés de 8%, un costo de cosecha y carga de 21 USD/m³, un flete de 180 km, con un costo de USD 0,084 USD/m³/km, y que el precio de la madera es de USD 63/m³. Se asume que

no se realizará destape de cepas y que se aplicará fungicida en los rebrotes, por lo que los costos de manejo (USD/ha efectiva) son: 30 en el año 0, 120 en los años 1 y 2 y 150 en el año 3. Así mismo, se asume un costo anual de administración de USD 30/ha, un costo anual por impuestos generales de USD 10/ha y un costo por caminería de USD 150/ha en el año 11. En este escenario la herramienta nos muestra que si la cosecha se realiza con Harvester, el VAN esperado es de 1051 USD/ha y si la cosecha se realiza con Feller el VAN esperado es de 660 USD/ha. De igual forma, si se analiza el resultado económico de una replantación con *E. smithii* (hoja VAN TIR alt3) con los mismos supuestos que se asumieron en la tesis (ver punto 2.2.1 Datos para el análisis económico), el VAN esperado es de 1110 USD/ha. Estos resultados sugieren que, desde el punto de vista económico, es conveniente replantar el rodal, por lo que la elección de la maquinaria de cosecha no tiene importancia. Sin embargo, si por motivos financieros se decide manejar rebrotes en la siguiente rotación (por ejemplo, si se prefiere utilizar en otro proyecto los ingresos generados en la cosecha), los resultados obtenidos demuestran la conveniencia de realizar la cosecha con Harvester.

Esta herramienta también puede utilizarse para analizar la posibilidad de realizar un manejo diferenciado de la plantación a ser cosechada. Si en la plantación existen zonas de diferente productividad y/o estado sanitario, se pueden establecer parcelas en diferentes puntos (tipo transecta) y calcular el resultado económico esperado para diferentes alternativas en cada zona. En base a dicho análisis se podrían identificar zonas donde el manejo de rebrotes es más rentable y zonas donde es más rentable la replantación, lo que permitiría tomar la decisión más adecuada para cada situación.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió determinar los factores que afectan el rebrote de cepas en *E. globulus* y ajustar dos modelos para predecir el rebrote de cepas, uno a nivel de cepa individual y otro a nivel de parcela.

El modelo de predicción de rebrote de cepas a nivel de cepa individual incluyó como variables explicativas: fuente de semilla, maquinaria de cosecha, DAP, presencia de canchales y presencia de muerte apical. El destape de cepas (al menos en la forma que se realiza a nivel comercial), la podredumbre blanca y los brotes epicórmicos no tuvieron efecto significativo sobre la probabilidad de rebrote de cepas y por lo tanto no fueron incluidos en este modelo. Los factores que afectaron negativamente el rebrote de cepas fueron el uso de Feller como maquinaria de cosecha, la presencia de canchales en la corteza y la presencia de muerte apical. El tamaño del árbol también afectó la probabilidad de rebrote de la cepa, se observó que a mayor diámetro mayor probabilidad de rebrote.

El modelo de predicción de rebrote de cepas a nivel de parcela incluyó las mismas variables (y coeficientes con igual signo) que el modelo a nivel de cepa individual, excepto por la presencia de muerte apical, que en este caso no entró como variable explicativa.

Estos resultados sugieren que, si el productor decide realizar manejo de rebrotes en la siguiente rotación, debería cosechar su plantación con Harvester y no realizar destape de cepas (al menos de la forma en que se hace actualmente).

Los modelos predictivos generados presentan algunas limitantes, relacionadas con el volumen de información utilizada, por lo que sería conveniente realizar estudios similares que permitan su validación mediante parcelas independientes.

En base al análisis económico podemos concluir que, con los supuestos considerados, todas las alternativas analizadas son económicamente rentables, con VAN positivos y TIR superiores a la tasa de descuento propuesta. Sin embargo, los bajos costos de manejar rebrotes, junto con la exoneración del IRAE, hacen que esta alternativa sea en general más rentable y presente menor riesgo ante cambios en la

productividad, en los costos de producción y/o en el precio de la madera, que la replantación con las especies consideradas en este estudio.

La decisión de realizar manejo de rebrotes tiene como ventaja adicional para los productores de la zona sureste el mantenimiento de las plantaciones de *E. globulus* y por tanto del mercado externo, lo cual se traduce en bajos costos de flete y buenos precios de la madera. Esto último es de gran importancia para este subsector, ya que el precio de exportación actúa como precio de referencia en el mercado local.

El análisis económico también presenta algunas limitantes, relacionadas con la incertidumbre de algunos de los datos utilizados, como la productividad esperada en las diferentes alternativas y el precio de venta de algunas especies. Para *E. dunnii* se contó solamente con la información del precio de compra en planta, y para *E. smithii* se asumió el mismo precio que para *E. globulus*, lo que sugiere la necesidad de monitorear la evolución de dichos precios y/o ampliar el análisis de sensibilidad considerando un mayor rango de variación. De todas formas, la herramienta desarrollada permite simular diferentes escenarios, asumiendo mayor o menor riesgo en los diferentes factores que determinan la rentabilidad de cada alternativa, y en definitiva tomar decisiones más informadas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control, 19 (6): 716-723.
- Alonso R, Lupo S, Martínez S, Tiscornia S, Bettucci L. 2012. Development of sprouted stumps of *Eucalyptus globulus* and *E. maidenii* in Uruguay. Australian Forestry, 75: 130-134.
- Balmelli G. 2014. Impacto de *Mycosphaerella* en Uruguay y variabilidad genética para resistencia a la enfermedad en *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus maidenii*. Tesis Doctoral. Valladolid, España. Universidad de Valladolid. 136 p.
- Balmelli G, Resquín, F. 2002. Evaluación del crecimiento de especies de *Eucalyptus* en diferentes zonas de prioridad forestal. Tacuarembó, Uruguay: INIA, Serie Aftercare Forestal INIA - JICA, 14. 20 p.
- Balmelli G, Resquín F. 2005. Efecto de enfermedades del fuste en *Eucalyptus globulus*. Montevideo, Uruguay. Revista de la Sociedad de Productores Forestales: Forestal, 27: 9-14.
- Barrios G. 2011. La madera tiende a ser el rubro número uno en las exportaciones. Agenda Forestal, 3: 27-29.
- Bettinger P, Boston K, Siry JP, Grebner D. 2017. Valuing and characterizing forest conditions. En Bettinger P, Boston K, Siry JP, Grebner D, (Eds). Forest Management and Planning (Second edition). New York, NY Academic Press, 21-64.
- Broomker M, Kleinig D, 1990. Field guide to Eucalypts South-eastern Australia. Vol 2. Sydney. Ed. Inkata Press, 205 pp.
- Camargo F, Silva C, Stape JL. 1997. Resultados experimentais da fase de emissão de brotação em *Eucalyptus* manejado por talhadia. Serie Técnica IPEF v. 11, n. 30, p. 115-122.

- Cerdas J, Cifuentes L. 2012. Uso de curvas ROC en investigación clínica. Aspectos teórico-prácticos. *Revista Chilena de Infectología*, 29 (2): 138-141.
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias) 2014. Producción [En línea]. En: Anuario Estadístico Agropecuario 2014. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Consultado 20 diciembre 2018. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/Dieaanterior/Anuario2014/diea-Anuario%202014-Digital01.pdf>.
- Doldán J, Fariña I, Tarigo F. 2008. Utilización de *Eucalyptus* spp. Alternativas de plantaciones uruguayas para pulpa Kraft. *INNOTEC*, 3: 30-34.
- Drake P, Mendham D, White D, Ogden G. 2009. A comparison of growth, photosynthetic capacity and water stress in *Eucalyptus globulus* coppice regrowth and seedlings during early development. *Tree Physiology*, 29: 663–674. doi:10.1093/treephys/tpp006.
- Elevitch CR, Wilkinson KM. 2000. Economics of farm forestry: financial evaluations for landowners. Honolulu, Hawaii, USA, Permanent Agriculture Resources. *Agroforestry Guides for Pacific Island* N° 7.
- FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal, FAO: Estudios de silvicultura y productos forestales. Roma. FAO (Estudio FAO Montes N° 11). 723 p.
- FAO. 1980. Análisis económico de proyectos forestales. Roma. FAO (Estudios FAO Montes N° 17). 240 p.
- Fawcett, T. 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27: 861-874.
- García O. 1998. Estimating top height with variable plot sizes. *Canadian Journal of Forest Research*, 28: 1509-1517.
- Giambruno F, López S. 2010. Medición de activos forestales en Uruguay. Trabajo de Investigación Monográfico para la Obtención del Título de Contador Público-

- Plan 90. Montevideo, Uruguay Universidad de la República Facultad de Ciencias Económicas y Administración. 119 p.
- Hamilton, L. 2005. Managing Eucalyptus coppice. Plantation Guidelines 21. Department of Primary Industries, Victoria. Consultado 15 julio 2019. Disponible en: <http://nla.gov.au/nla.arc-61272>.
- Higa R, Sturion JA. 1997. Capacidade de brotação em subgêneros e espécies de Eucalyptus. Serie Técnica IPEF, 11 (30): 23-30.
- Hirigoyen A. 2016. Desarrollo de un modelo dinámico de rodal para *Eucalyptus globulus* L. en Uruguay. Tesis Magíster Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 129 p.
- Hosmer D, Lemeshow S. 2000. Applied Logistic Regression. Canadá. Wiley Series in Probability and Statistics; 2ª edición.
- Klein J, Bortolas E, Francisco de Assis T, Perrando E. 1997. Fatores operacionais que afetam a regeneração do Eucalyptus manejado por talhadia. Serie Técnica IPEF, 11 (30): 95-104.
- Little KM, Gardner R. 2003. Coppicing ability of 20 Eucalyptus species grown at two high-altitude sites in South Africa. Canadian Journal of Forest Research, 33: 181–189.
- Little KM, MacLennan L. 2001. Coppicing potential of *Eucalyptus nitens*: results of a field survey. ICFR Innovations 2001/02. Pietermaritzburg: Institute for Commercial Forestry Research.
- Louviere JJ, Hensher AD, Swait DJ. 2000. Stated choice methods. New York: Cambridge University Press.
- MGAP-DGF (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca – Dirección General Forestal). 2018. Cartografía forestal nacional. Montevideo, Uruguay. [En línea]. Consultado diciembre 2019. Disponible en

<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/datos/resultados-cartografia>.

- Morales Olmos V, Ansuberro J, Pintos M, Perez G. 2018. Panorama empresarial del sector forestal uruguayo productor de *Eucalyptus globulus*. Agrocienca. [En línea]. 22(1): 133-139.
- Pacheco J, Casado S, Nuñez L. 2007. Algoritmos meméticos para selección de variables en el análisis discriminante. Estadística Española 49(165): 333-347.
- Pando Fernández V, San Martín Fernández. 2004. Regresión logística multinomial. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, (18). <https://doi.org/10.31167/csef.v0i18.9478>.
- Pérez G, Hunter G, Slippers B, Pérez CA, Wingfield BD, Wingfield, MJ. 2009. *Teratosphaeria (Mycosphaerella) nubilosa*, the causal agent of Mycosphaerella leaf disease (MLD), recently introduced into Uruguay. European Journal of Plant Pathology, 125: 109-118.
- Petterson, A. 1955. Die Massenproduktion des Nadelwaldes. Mittlg. D. Forstl. Forsch. Anst. Schwedens, Band 45, N° 1b.
- Prado JA, Bañados JC, Bello DA. 1990. Antecedentes sobre la capacidad de retoñación de algunas especies de género *Eucalyptus* en Chile. Ciencia e Investigación Forestal, 4: 183-190.
- R Core Development Team. 2019. R language definition. Vienna, Austria: R foundation for statistical computing.
- Rodríguez, A. 2011. El *Eucaliptus globulus* es un speciality. Agenda Forestal 3: 35-37.
- Schiattino I, Silva C. 2008. Árboles de Clasificación y Regresión: Modelos Cart. Ciencia y Trabajo, 10: 161–166.
- Schönau APG. 1991. Growth, yield and timber density of short rotation coppice stands of *Eucalyptus grandis*. South African Forestry Journal, 156: 12–22.

- Stape JL. 1997. Planejamento global e normatização de procedimentos operacionais da talhadia simples em *Eucalyptus*. Serie Técnica IPEF 11(30): 51–62.
- Toval G. 2010. Calidad de la madera de *Eucalyptus globulus* como materia prima para la industria pastero-papelera. Boletín del CIDEU, 8-9: 5-14.
- Uruguay. Poder Legislativo. 1988. Ley forestal No. 15.939. (en línea) Consultado 20 noviembre 2019. Disponible en <https://parlamento.gub.uy/documentosyleyes>.
- Whittock SP, Apiolaza LA, Kelly CM, Potts BM. 2003. Genetic control of coppice and lignotuber development in *Eucalyptus globulus*. Australian Journal of Botany, 51: 57-67.
- Youden, W.J. 1950. Index for Rating Diagnostic Tests. Cancer, 3: 32-35. [http://dx.doi.org/10.1002/1097-0142\(1950\)3:1<32::AID-CNCR2820030106>3.0.CO;2-3](http://dx.doi.org/10.1002/1097-0142(1950)3:1<32::AID-CNCR2820030106>3.0.CO;2-3).

6. ANEXO

Tabla de valores de análisis de sensibilidad.

Variable	Rebrotos sin fungicida		Rebrotos con fungicida		E. smithii		E. dunni		E. gibbuis clonal			
	IMA m ³ /ha	VAN USD	TIR %	IMA m ³ /ha	VAN USD	TIR %	IMA m ³ /ha	VAN USD	TIR %	IMA m ³ /ha	VAN USD	TIR %
IMA m ³ /ha	-20%	9,68	18,75%	10,88	660	16,00%	17,6	404	10,20%	17,6	-348	5,56%
	-10%	10,88	20,77%	12,24	883	17,91%	19,8	741	11,80%	19,8	-111	7,28%
		12,1	22,57%	13,6	1170	20,03%	22	1110	13,30%	22	158	8,95%
	+10%	13,32	24,36%	14,96	1400	21,53%	24,2	1432	14,50%	24,2	379	10,17%
	+20%	14,52	26,04%	16,32	1707	23,30%	26,4	1753	15,60%	26,4	600	11,26%
	USD/m ³	VAN USD	TIR %	USD/m ³	VAN USD	TIR %	USD/m ³	VAN USD	TIR %	USD/m ³	VAN USD	TIR %
Precio de venta USD/m ³	-10%	56,7	17,97%	56,7	647	15,80%	56,7	455	10,50%	55,8	-487	4,42%
	-5%	59,85	20,46%	59,85	909	18,11%	58,85	679	11,50%	58,9	-164	6,91%
		63	22,57%	63	1170	20,03%	63	1110	13,30%	62	158	8,95%
	+5%	66,15	24,41%	66,15	1432	21,72%	66,15	1438	14,50%	65,1	480	10,68%
	+10%	69,3	26,04%	69,3	1694	23,23%	69,3	1766	15,60%	68,2	803	12,19%
	km	VAN USD	TIR %	km	VAN USD	TIR %	km	VAN USD	TIR %	km	VAN USD	TIR %
Distancia al punto de venta Km	-100%	80	27,04%	80	1868	24,16%	80	1984	16,00%	260	844	12,37%
	-50%	130	24,98%	130	1519	22,25%	130	1547	15,00%	310	501	10,79%
		180	22,57%	180	1170	20,03%	180	1110	13,00%	360	158	8,95%
	+50%	230	22,53%	230	1165	20,00%	230	1104	13,00%	410	-185	6,77%
	+100%	280	20,30%	280	891	17,96%	280	761	12,00%	460	-528	4,05%

7. PREDICTIVE MODEL OF STUMP REGROWTH IN *EUCALYPTUS GLOBULUS* BASED ON PRE-HARVEST INFORMATION

Pilar Gasparri, Andrés Hirigoyen, Cecilia Rachid, Gustavo Balmelli

Abstract

Due to the quality of its pulpwood and, therefore, its high market value, *Eucalyptus globulus* was one of the most planted species in the Southeast of Uruguay. The species of the genus *Eucalyptus* have a great capacity for regeneration after cutting, which is due to the presence of adventitious shoots, as well as lignotubers at the base of the tree. This ability allows a second rotation as a coppice crop. The decision to keep the plantation in the next rotation as a coppice crop or to replant depends on the expected economic result of both alternatives. The problem that foresters face in making this decision is the difficulty of predicting the expected productivity in the next rotation, which, in the case of the coppice crop, will depend largely on the percentage of stumps that regrowth. With the purpose of contributing to decision-making in the forestry sector, the objective of this work was to fit a predictive model for survival of stumps in plantations of *Eucalyptus globulus* with pre-harvest information. Thirty-three plots were established in plantations prior to harvest, in which dasometric data and health status of each tree were recorded. At 8 months post-harvest, the percentage of regrowth was evaluated. Using logistic regression, a model to predict the probability of regrowth at plot level was adjusted. The model included as explanatory variables: the genetic material of the plantation, the type of machine used in the harvest, the proportion of trees with DBH > 14 cm, and the proportion of trees with presence of bark cankers. The overall fit of the model, measured by Mc-Fadden's Pseudo R^2 , was 0.622. This is the first predictive model of stumps regrowth published for *Eucalyptus*. Its application will allow forest managers to make more informed decisions about the next rotation in *E. globulus* plantations.

Keywords: Regrowth, dasometric data, health status, second rotation.

Authors. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Programa de Producción Forestal. Estación Experimental INIA Tacuarembó. Ruta 5, km 386, Tacuarembó, Uruguay.

1. Introduction

Wood production in Uruguay is based in commercial plantations, mainly with industrial purposes; the predominant products being: rolls, chips, sawn wood and plywood. The destination may vary according to the species and the management of the plantation, which can allow the production of quality wood for sawing and veneer, mainly of *E. grandis*, or the production of cellulose, being the predominant species *E. grandis*, *E. globulus*, *E. maidenii* and *E. dunnii* (Giambruno and López., 2010).

Eucalyptus globulus was the first eucalypt planted extensively outside its area of origin, Tasmania and southeast Australia; being introduced in Uruguay in 1853 (FAO, 1981). It was the most planted species in the country, but due to its high susceptibility to diseases and pests and its lack of adaptation, in recent years it has been restricted to the Southeast of the country, where it is the predominant species. It has one of the best woods as raw material for the manufacture of bleached kraft pulp and its subsequent application in the manufacture of different types of papers. It has an average density of 553 kg/m³ and a gross cooking yield of 55.6% (Toval, 2010). These characteristics determine a higher wood price than other eucalypt species and guarantee external market demand.

The species of the genus *Eucalyptus* have a great capacity for regeneration after cutting. This capacity, which is due to the presence of adventitious buds, as well as lignotubers at the base of the tree, allows the handling of a second rotation through the stump regrowth (coppice crop). *E. globulus* has a good regrowth capacity, with percentages varying from 67% (Whittock *et. al.*, 2003) up to 93% (Prado *et. al.*, 1990). The productivity of the plantation as coppice crop depends on the survival of the stumps and their subsequent growth rate. According to Hamilton (2005), the stock of recovered stumps should be above 75%, otherwise replanting should be considered.

Artículo enviado a Annals of Forest Research.

54

<https://www.afrjournal.org/index.php/afri>

Schönau (1991) suggests a minimum stock of 1000 viable stumps per hectare for successful regrowth management, since with a lower stock it would be difficult to compensate the death of stumps with the retention of more than one outbreak per stump. According to this author, with an adequate stock of stumps, a yield similar to that of the original crop can be obtained, which represents a very attractive production alternative given the costs of implantation are minimal.

Different factors can affect the survival of the stumps: genetics (species, seed origin or clone), environment (soil type, rainfall, etc.) and management (stump height, stump damage during harvest, soil compaction, harvest time and coverage of stumps by residues) (Stape, 1997). The age, size and health status of the tree at the time of harvest can also affect the potential for regrowth of stumps (Little and MacLennan, 2001; Balmelli and Resquín, 2005). Differences between *Eucalyptus* species in the regrowth capacity of stumps have been reported in different studies (Higa and Sturion, 1997; Little and Gardner, 2003). Klein *et. al.*, (1997), reports on operational factors that affect the regrowth, such as crop waste management, that increased the survival of regrowths in *E. grandis* and *E. saligna*, and the height of the cut, which increased the stump survival when it was taller (up to 10 cm). Balmelli and Resquín (2005), reported an average regrowth of 62.5% in *E. globulus* and found that the higher the DBH of the tree, the lower is the stump mortality. These authors also evaluated the effect of stem diseases, reporting that the presence of stem white rot did not affect the ability to regrowth, while bark cankers, as well as epicormic outbreaks, had a negative effect. Another study on the regrowth of *E. globulus* and *E. maidenii* stumps, reports that when the bark of the stump was detached by more than 40%, the survival of the regrowth was significantly reduced (Alonso *et. al.*, 2012).

The decision to keep the plantation in the next rotation (through the management of regrowths) or to replant depends on the expected economic result for both alternatives. The problem that foresters face in making such a decision is the difficulty estimating expected productivity in the next rotation of regrowths, which depends largely on the population achieved, that is, the number of live stumps per hectare. This difficulty, or

uncertainty, is given by the scarce information on the factors that affect the mortality of the stumps and on how to predict stump survival. For this reason, and with the purpose of contributing to decision-making in the forestry sector, this research proposes to identify the factors that affect the mortality of stumps and to adjust a predictive model for the survival of stumps in *E. globulus* plantations.

2. Materials and methods

2.1 Study site

The present study was carried out in stands of *E. globulus* in two zones of southeastern Uruguay that would be harvested in June-July 2017. This region is characterized to present a humid subtropical climate, with an annual rainfall average of 1000 mm. The average annual temperature is 16 °C, with a minimum monthly average of 6 °C and a maximum monthly average of 30 °C. Stands with different genetic material (commercial seed Jeeralang, Salus, Madalya, Yeodene and a clone), which would be harvested with Feller buncher or Harvester, and that would have or not waste management postharvest (manual stump uncover), were selected. In this way, stands with eleven different combinations of these factors were available (Table 1).

In each combination of factors, 3 plots (3 replications) were randomly installed. However, at each replication of combinations 6-7 and 8-9 the plots were installed in a paired manner to reduce extrinsic factors on the machinery evaluation. Similarly, to evaluate the effect of waste management, the plots of combinations 3-4 and 10-11 were installed paired. In all cases the size of the plots was 1000 m², with a preset width of 6 rows of trees. To install each plot, the width of the 6 rows was measured and then the length necessary to obtain the 1000 m² was calculated. The first tree of the first row was georeferenced and the first tree of each row was marked with a numbered plate.

Table 1. Characteristics of the *E. globulus* stands where the plots included in the study were installed.

Combination	Department	Genetics	Harvest Machinery	Waste Management
1	Rocha	Madalya	Harvester	Yes
2	Rocha	Yeodene	Harvester	Yes
3	Lavalleja	Jeeralang	Harvester	Yes*
4	Lavalleja	Jeeralang	Harvester	No*
5	Lavalleja	Jeeralang	Harvester	Yes
6	Lavalleja	Salus	Harvester*	Yes
7	Lavalleja	Salus	Feller buncher*	Yes
8	Lavalleja	Clone	Harvester*	Yes
9	Lavalleja	Clone	Feller buncher*	Yes
10	Lavalleja	Jeeralang	Harvester	Yes*
11	Lavalleja	Jeeralang	Harvester	No*

(*) In these combinations the plots were paired, minimizing the variation due to extrinsic factors.

2.2 Data collection

The first assessment of the plots was carried out pre-harvest (May 2017), when dasometric data and health status were evaluated. It was recorded: number of trees planted, number of trees standing, diameter at breast height (DBH) of all trees and tree height in rows 4 and 6, with digital Vertex (the height of the remaining trees was estimated, using the Petterson model (Petterson, 1955)). To characterize the health status of tree stems, the presence of stem white rot by *Inocutis jamaicensis*, bark cankers by *Botryosphaeria* and/or *Coniothyrium*, epicormic shoots, and apical death were recorded in all trees. A dichotomous health evaluation (presence/absence) was performed, with 0 for symptom absence and 1 for presence. For the presence of stem

white rot, the sign and/or the symptom of *Inocutis jamaicensis* was considered as disease presence (Figure 1 a and b), for bark cankers it was recorded as an absence when the symptom was mild or absent and presence when it was marked (Figure 1 c and d). For epicormic shoots it was considered as presence when there were more than 3 outbreaks (Figure 1 e), and dry-tipped trees were recorded as having apical death (Figure 1 f).



Figure 1. Stem health evaluation: a) Fructification (basidiocarps) of *Inocutis jamaicensis*, b) characteristic symptom (flattening of the stem) of *Inocutis jamaicensis*, c) absence of bark cankers d) presence of cankers by *Botryosphaeria* and/or *Coniothyrium*, e) epicormic shoots, and f) apical death.

The descriptive statistics of the health status of the plots are shown in Table 2.

Table 2. Descriptive statistics of the health status of the plots.

Variable	Mean	Mínimum	Máximo	Standard deviation
Percentage with apical death	5%	0%	18%	6%
Percentage with epicormic shoots	8%	0%	35%	10%
Percentage with bark cankers	5%	0%	21%	6%
Percentage with stem white rot	9%	0%	30%	7%

The stump regrowth evaluation was carried out at 8 months post-harvest (February-March 2018). The presence of regrowths in each stump was recorded, without considering their quantity or quality (Figure 2).



Figure 2. Evaluation of regrowths: a) regrowth of stump on plot without waste management; b) regrowth of stump on a plot with waste management; c) stump with detached regrowth; d) stump without regrowth. Situations a, b and c were considered as presence of regrowths (1), while situation d is recorded as absence (0).

2.3 Statistical analyzes

The individual effect of each variable was analyzed using ANOVA and, when appropriate, Tukeys means comparison test, was performed. Then, a predictive model for regrowth of stumps, at the plot level, was adjusted through logistic regression analysis. Logistic regression is a statistical method that allows evaluating the probability of an event (in this case the regrowth of the stumps) depending on the categories or values of the independent variables (in this case, genetic material, type of harvest, waste management, tree growth, and health status).

Different distribution functions have been proposed for this type of dichotomous response, with the logistic distribution (Hosmer and Lemeshow 2000) being the most widely used.

The logistic regression model used was:

$$\pi(x) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n}} \quad (1)$$

Where $\pi(x)$ is the probability that the event occurs, β_0 is the constant and $\beta_n x_n$ are the coefficients of the model's x_n predictors. Through a logit transformation of $\pi(x)$ the parameters are linearized, being:

$$g(x) = \ln \left[\frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} \right] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (2)$$

Where $g(x)$ represents, on a logarithmic scale, the difference between the probabilities of occurrence and non-occurrence of the event, which, being a linear function of the explanatory variables, facilitates the estimation and interpretation of the model. For the adjustment of the model, independent variables were selected using stepwise selection procedure (Efroymson, cited by Pacheco *et al.*, 2007). This method contrasts the input of each variable based on the significance of the scoring statistic and contrasts the elimination based on the probability of the Wald statistic. In this way, several alternative models were defined. To select the model with the best fit, the Akaike information criterion (AIC) was used (Akaike, 1974). A lower AIC value indicates

that the model is better suited to experimental data and/or that it is simpler. Graphical analysis where used to examine the relationships of the data and the adjusted residuals to detect anomalous behaviors.

For the adjustment of the model the plot was used as an experimental unit. Type of machinery and waste management were analyzed as dichotomous variables. Dummy dichotomous qualitative variables were used for the plantation genetic material. The Clone category was taken as a reference and each of the variables created, Salus, Madalya, Yeodene and Jeeralang, would enter the model as a dichotomous variable, with presence as 1 and absence as 0. The DBH entered the set of predictor variables as the proportion of trees larger than a certain value, which divides the data set into two more homogeneous groups based on their diameter. Different cut points were evaluated to homogenize the groups through classification and regression trees (Schiattino and Silva, 2008). Health variables were analyzed as the proportion of trees with the presence of each kind of symptom. A summary of the type of variables used in the analysis is presented in Table 3.

To assess the quality of fit of the model, the Pseudo R2 coefficients of Mc-Fadden was used (Pando Fernández and San Martín Fernández, 2004). The likelihood is essential to assess the predictive capacity of the model, for which the deviance of the model (deviance) was used, which was calculated through the formula:

$$L = 2 \ln \left(\frac{\text{likelihood null model}}{\text{likelihood model}} \right) \quad (3)$$

Table 3. Type of variables used in the analysis.

Dependent variable	Type	
Stump regrowth	Quantitative	Proportion of resprouted stumps
Independent variables		
		Reference Clone
Seed source	Dummy	Jeeralang } 0 Absence
		Madalya } 1 Presence
		Salus }
		Yeodene }
Machinery type	Categorical Nominal	0: Feller buncher 1: Harvester
Waste management	Categorical Nominal	0: Without 1: With
Stem white rot	Quantitative	Proportion of trees with presence
Stem cankers	Quantitative	Proportion of trees with presence
Epicormic shoots	Quantitative	Proportion of trees with presence
Apical death	Quantitative	Proportion of trees with presence
DBH	Quantitative	Proportion of trees with presence of DBH higher than the cutoff point

3. Results

At 8 months after harvest, out of 2849 trees evaluated, 2447 stumps rebounded, that is, 85.9%. The plot with the highest regrowth had 100% of resprouted stumps and the plot with the lowest regrowth 41.2%, with an average plot-level of 85.4%.

3.1 Effect of independent variables on stump mortality

The statistical analysis of the effect of each variable revealed that there are significant differences in the percentage of stumps resprouted for all the variables studied, except for waste management and presence of stem white rot (Table 4). The genetic material that presented the highest percentage of regrowth was the Jeeralang seed, with 93.2%, and the one with the lowest regrowth was the Yeodene seed, with 68.8%.

The percentage of resprouted stumps in plots harvested with Harvester was higher than that of plots harvested with Feller buncher. Trees without bark cankers, epicormic shoots or apical death had a higher percentage of regrowth than trees with the presence of these stem diseases symptoms.

3.2. Predictive model for stump survival.

As mentioned in the materials and methods section, for the adjustment of the predictive model, the effect of DBH on the regrowth of stumps was analyzed as the proportion of trees larger than a certain value that divides the data set into two more homogeneous groups. This value was 14 cm, with the group of trees with higher DBH having higher percentage of regrowth.

The model with the best fit presented an Akaike value of 202.4. The factors identified as significant and included in the model were: the genetic material, the proportion of trees with DBH > 14 cm, the proportion of trees with bark cankers, and the type of harvesting machinery used. The overall fit of the model, measured by Mc-Fadden's Pseudo R², was 0.622, and the deviance of the adjusted model was 65.53, with a p-value 5.55e-16.

The predictive model of the probability of regrowth at plot level was:

$$g(x) = \ln \left[\frac{\pi(x)}{1-\pi(x)} \right] = -2,10 + 1,51 (\text{Harvester}) - 0,07 (\text{Jeeralang}) - \quad (4)$$

$$1,60 (\text{Madalya}) - 0,66 (\text{Salus}) - 2,4 (\text{Yeodene}) -$$

$$3,27 (\text{Prop. of trees with cankers}) + 4,67 (\text{Prop. of trees with DBH} > 14 \text{ cm})$$

In the adjusted model it can be observed that the sign of the coefficients of some variables (Harvester and proportion of trees with DBH > 14 cm) was positive, indicating that the variable increases the probability of stump regrowth, and that that of other variables (seed origin and proportion of trees with bark cankers) was negative, indicating that they decrease the probability of regrowth (Table 5).

Table 4. Statistical analysis of the effect of each variable on the proportion of resprouted stumps.

	Regrowth of the stump		Total	% of regrowths	<i>p</i> -value	Tukey
	No	Yes				
Genetic material					2,2e ⁻¹⁶	
Clon	39	472	511	92,4%		b
Madalya	68	189	257	73,5%		c
Jeeralang	92	1284	1378	93,2%		a
Salus	120	319	439	72,7%		d
Yeodene	83	183	266	68,8%		e
DBH					<2,2e ⁻¹⁶	
DBH <14 cm	165	457	622	73,5%		b
DBH >14 cm	237	1990	2227	89,35%		a
Harvest machinery (*)					3,2e ⁻¹⁵	
Harvester	36	444	480	92,5%		a
Feller buncher	123	347	470	73,8%		b
Waste managment (*)					0,86	
Yes	31	504	535	96%		n/a
No	29	493	522	94%		n/a
Stem white rot					0,08	
Yes	51	239	290	82,4%		n/a
No	351	2208	2559	86,3%		n/a
Epicormic shoots					2,2e ⁻¹⁶	
Yes	123	186	309	60,2%		b
No	279	2261	2540	89,0%		a
Bark cankers					1,37e ⁻⁰⁹	
Yes	57	128	185	69,2%		b
No	345	2319	2664	87,0%		a
Apical death					<2,2e ⁻¹⁶	
Yes	96	69	165	41,8%		b
No	306	2378	2684	88,6%		a

Table 5. Coefficient, standard error and significance of the variables included in the predictive model for probability of regrowth at plot level.

Coefficient	β	Standard error	Significance
Intercept	-2,10	1,02	0,039
Jeeralang seed	- 0,07	0,32	0,82
Salus seed	- 0,66	0,32	0,04
Madalya seed	- 1,60	0,35	6,29e ⁻⁰⁶
Yeodene seed	- 2,40	0,29	3,57e ⁻¹⁶
Harvest with Harvester	1,51	0,20	5,03e ⁻¹³
Proportion of DBH > 14 cm	4,67	1,16	5,99e ⁻⁰⁵
Proportion of bark cankers	- 3,27	1,30	0,012

Through the graphical analysis of residues, it was observed that there are two data outside the range -3 and 3 in the graph of residuals vs. the linear predictor, but no value with Cook distance greater than 1 , which indicates that they are not influential data for any variable and therefore were maintained in the analysis.

4. Discussion

The percentages of regrowth obtained in the present study were similar to those reported on *E. globulus* by Balmelli and Resquín (2005), Whittock *et. al.*, (2003) and Prado *et. al.*, (1990), which vary between 62.5 and 93%, and are larger than those reported by Alonso *et. al.*, (2012), who recorded a regrowth percentage of only 15% (although this study was conducted in a zone where *E. globulus* has very poor adaptation).

The variables that significantly affected the capacity of stump regrowth were the plantation genetic material, the type of harvest machine used, the proportion of trees with DBH higher than 14 cm, the proportion of trees with presence of bark cankers, the proportion of trees with epicormic shoots, and the proportion of trees with apical

death. By contrast, the management of harvest residues and the presence of stem white rot did not affect the regrowth capacity. These results agree with those obtained by Whittock *et. al.*, (2003), who report significant differences between *E. globulus* subraces in stumps survival. In the present study, the stands with Jeeralang seed were the ones that presented the highest percentage of regrowth, which could be explained by a good sanitary condition and by the fact that no plot of Jeeralang was harvested with Feller buncher. The same study by Whittcok *et. al.*, (2003) shows that the regrowth is correlated with the pre-harvest DBH, which is also consistent with our results, where the proportion of trees with DBH greater than 14 cm increased the probability of stump regrowth.

Camargo *et. al.*, (1997) observed that the damage to the bark, simulating possible damage of the harvesting machinery, significantly reduced survival and the number of regrowths per stump. This is consistent with the study by Alonso *et. al.*, (2012), who reported that the higher the bark shedding, the lower the percentage of regrowth. The present study showed differences between the machinery used in the harvest, being the one carried out with Harvester which achieves a higher percentage of regrowths. These differences could be due to the cutting methodology, since the Harvester has a cleaner cut, no tearing of fibers and make less damage to the bark than the Feller buncher.

No significant differences were found between the uncovering or not of the stumps after harvest. These results are similar to those obtained by Camargo *et. al.*, (1997), but are different from those obtained by Klein *et. al.*, (1997), who reported that waste management increased the survival of *E. grandis* and *E. saligna* stumps by 24%. This difference could be explained by the fact that the waste management carried out in the present work is the one used commercially, which does not represent to a real uncovering of the stumps, but a clearing of the branches that remain on the stumps head.

The effect of sanitary variables on the stump regrowth capacity was consistent with what was observed by Balmelli and Resquín (2005), who reported that the higher the incidence of bark cankers and epicormic shoots, the greater the mortality of the stumps,

and that the presence of stem white rot does not affect the regrowth capacity of the stumps.

The predictive model adjusted for likelihood of regrowth included as explanatory variables all the variables with significant effect on stump regrowth, except for the presence of epicormic shoots and the presence of apical death. This could be due to the fact that the effect of these variables is diluted when analyzed as a proportion of trees with the presence of symptoms and/or that these variables are correlated with one or more of the variables included in the model.

The overall fit of the model presented a value above the range of good fit suggested by Louviere *et. al.*, (2000), and the deviance of the adjusted model suggests that the variables entered into the model, taken as a whole, effectively contribute to explaining the variations in the probability of regrowth.

It should be noted that the predictive model was not validated due to the relatively small number of plots, which required that all data be included in the adjustment. For this reason, it would be necessary to validate it by taking data in new plantations of *E. globulus* that are about to be harvested to compare the results (predicted values) with the observed values (real % of regrowth).

It is also necessary to relativize the scope of the results of the present study, since it is based on data from a single year and a single harvest season. The one-year analysis also limited the availability of plantations to be studied, which limited the variability of the data set. For all the above, it is suggested for future research to repeat data collection in different years and at different harvest times to adjust a more robust model.

Despite the previously mentioned limitations, this is the first predictive model published in eucalypts for regrowth of stumps. The model will not only allow quantify the population of live stumps expected for the next rotation but will also serve to analyze the convenience of conducting a differentiated management of the plantation to be harvested. For example, if there are zones in the plantation with different

productivity and/or sanitary status, plots can be established at different points (transect type) and estimate the probability of resprout for each zone. This information can be used to estimate the expected economic result in the next rotation for different zones of the plantation and, therefore, to identify those zones where regrowth management is more profitable and those where replanting is preferable, which would allow the most appropriate decision to be made for each situation.

5. Conclusions

The present work allowed to determine the factors that affect the regrowth of stumps of *E. globulus* in the Southeast of Uruguay and to adjust a model to predict the regrowth in a stand, based on pre-harvest information. The factors that negatively affected the regrowth of stumps were the use of Feller buncher as harvesting machine, the presence of cankers in the bark, the presence of epicormic shoots, and the presence of apical death. The size of the tree also affected the regrowth capacity, being higher in the group of trees with DBH greater than 14 cm. The uncovering of stumps (at least in the form that is carried out commercially) and the presence of stem white rot had no effect on the probability of stumps resprouted. The adjusted regrowth model includes as predictive variables the genetic material of the plantation, the type of machine used in the harvest, the proportion of trees with DBH > 14 cm, and the proportion of trees with bark cankers. These results demonstrate that if the forest manager decides to maintain the plantation in the next rotation as a coppice crop, he should harvest with a Harvester machine. They also suggest that the uncovering of stumps after harvesting is ineffective and, therefore, that the important costs that this management implies can be avoided without consequences on the number of live stumps in the next rotation.

6. Acknowledgements

We are grateful to Redalco S.A, Iberpapel and Forestal Atlántico Sur for allowing us access to their plantations and for the logistic support provided. The study was funded

by a scholarship awarded by INIA (National Institute of Agricultural Research) to the first author.

7. References

Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control, 19 (6): 716-723.

Alonso R, Lupo S, Martínez S, Tiscornia S, Bettucci L. 2012. Development of sprouted stumps of *Eucalyptus globulus* and *E. maidenii* in Uruguay. Australian Forestry, 75: 130-134.

Balmelli G, Resquín F. 2005. Efecto de enfermedades del fuste en *Eucalyptus globulus*. Montevideo, UY. Revista de la Sociedad de Productores Forestales. Forestal, 27: 9-14.

Camargo F, Silva C, Stape JL. 1997. Resultados experimentais da fase de emissão de brotação em *Eucalyptus* manejado por talhadia. Serie Técnica IPEF, 11(30): 115-122.

Cerda J, Cifuentes L. 2012. Uso de curvas ROC en investigación clínica. Aspectos teórico-prácticos. Revista Chilena de Infectología, 29 (2): 138-141.

FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. FAO: Estudios de silvicultura y productos forestales. Roma. FAO. (Estudios FAO Montes N° 11.) 723p.

Fawcett T. 2006. An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, 27: 861-874.

Giambruno F, López S. 2010. Medición de activos forestales en Uruguay. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República, Facultad de Ciencias Económicas y Administración. 119 p.

Hamilton L. 2005. Managing *Eucalyptus* coppice. Plantation Guidelines 21. Department of Primary Industries, Victoria. <http://nla.gov.au/nla.arc-61272>.

Higa R, Sturion JA. 1997. Capacidad de brotación en subgéneros e especies de *Eucalyptus*. Serie Técnica IPEF, 11(30): 23-30.

Hosmer D, Lemeshow S. 2000. Applied Logistic Regression; Wiley Series in Probability and Statistics; 2ª edición, Canadá.

Klein J, Bortolas E, Francisco de Assis T, Perrando E. 1997. Factores operacionais que afetam a regeneração do *Eucalyptus* manejado por talhadia. Serie Técnica IPEF, 11(30): 95-104.

Little KM, Gardner R. 2003. Coppicing ability of 20 *Eucalyptus* species grown at two high-altitude sites in South Africa. Canadian Journal of Forest Research, 33: 181–189.

Little KM, MacLennan L. 2001. Coppicing potential of *Eucalyptus nitens*: results of a field survey. ICFR Innovations 2001/02. Pietermaritzburg: Institute for Commercial Forestry Research.

Louviere JJ, Hensher AD, Swait DJ. 2000. Stated choice methods. New York: Cambridge University Press.

Pacheco J, Casado S, Nuñez L. 2007. Algoritmos meméticos para selección de variables en el análisis discriminante. Estadística Española 49(165): 333-347.

Pando Fernández V, San Martín Fernández R. 2004. Regresión logística multinomial. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, (18). <https://doi.org/10.31167/csef.v0i18.9478>.

Prado JA, Bañados JC, Bello DA. 1990. Antecedentes sobre la capacidad de retoñación de algunas especies de género *Eucalyptus* en Chile. Ciencia e Investigación Forestal, 4: 183-190.

Schiattino I, Silva C. 2008. Árboles de Clasificación y Regresión: Modelos Cart. Ciencia y Trabajo, 10: 161–166.

Schönau APG. 1991. Growth, yield and timber density of short rotation coppice stands of *Eucalyptus grandis*. South African Forestry Journal, 156: 12–22.

Stape JL. 1997. Planejamento global e normatização de procedimentos operacionais da talhadia simples em *Eucalyptus*. Serie Técnica IPEF 11(30): 51–62.

Toval G. 2010. Calidad de la madera de *Eucalyptus globulus* como materia prima para la industria pastero-papelera. CIDEU, 8-9: 5-14.

Whittock SP, Apiolaza LA, Kelly CM, Potts BM. 2003. Genetic control of coppice and lignotuber development in *Eucalyptus globulus*. Australian Journal of Botany, 51: 57-67.