



DIAGRAMA DE MANEJO DE LA DENSIDAD PARA PLANTACIONES DE *Eucalyptus grandis* EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

D. Martín SANDOVAL¹, Marcelo F. ARTURI¹, Juan F. GOYA¹

RESUMEN

Los diagramas de manejo de la densidad (DMD) son una herramienta analítica que permite modelar y optimizar diferentes regímenes silvícolas al analizar la relación entre el tamaño de los árboles, expresado por el diámetro cuadrático medio, y la densidad del rodal. Este trabajo detalla el procedimiento para construir un DMD a partir de datos del inventario nacional de plantaciones de la provincia de Entre Ríos 2017. Los parámetros obtenidos incluyen una ordenada al origen (a) de 4,862 y una pendiente (b) de -1,403, valor ligeramente diferente del modelo clásico de -1,605 propuesto por Reineke. Los regímenes evaluados -sin raleo, raleo sistemático y raleo por lo bajo- partiendo de una densidad inicial de 1000 ind/ha, presentan rendimientos consistentes con la bibliografía actual. Se destaca la importancia de esta herramienta para la planificación silvícola, subrayando la necesidad de incorporar variables como el índice de sitio y la altura dominante promedio en el DMD, lo que permitiría estimar la edad óptima para las intervenciones.

Palabras claves: *raleo, autoraleo, Reineke*

1. INTRODUCCIÓN

La densidad de los rodales constituye un estado o factor de producción de suma importancia e impacto sobre las características de los individuos como de la estructura y producción del rodal en su conjunto. Los diagramas de manejo de la densidad (DMD) son modelos gráficos de la dinámica de rodales coetáneos (Newton, 1997). Reflejan las relaciones fundamentales que involucran el tamaño de los árboles, la densidad de los rodales, la ocupación del sitio y la mortalidad por autoraleo (Jack y Long, 1996). Representan la dinámica de la mortalidad provocada por la competencia densodependiente que permite al silvicultor disponer de una herramienta para pronosticar el desarrollo del rodal, comparar diferentes regímenes silviculturales y tomar decisiones en función de los objetivos de manejo mediante una herramienta simple (Shaw y Long, 2007).

Los DMD son modelos que pueden ser utilizados para lograr diferentes objetivos de manejo de las plantaciones, establecer el mejor nivel de densidad de acuerdo con esos objetivos mediante la determinación de un régimen óptimo de raleo, generar las condiciones adecuadas para suministrar servicios ecosistémicos como carbono o para propiciar la diversidad en sistemas implantados (Long y Shaw 2005; Shaw y Long, 2007; Castedo-Dorado et al., 2009; Vacchiano et al., 2008).

El concepto principal en el cual se basan estos DMD es el de la ley de autoraleo, la cual describe una relación universal entre el tamaño de los individuos (diámetro cuadrático medio, volumen) y la densidad del rodal (número de individuos por unidad de área). Diferentes autores y en diferente momento han establecido matemáticamente esta relación (Reineke, 1930, Yoda et al., 1963). Asimismo, existe un gran consenso sobre la independencia de estos índices de densidad de la edad y el índice de sitio (IS) del rodal, aunque algunos trabajos cuestionan la universalidad de estos supuestos (Weiskittel et al., 2009; Ge et al., 2017).

A nivel nacional no se registran antecedentes que permitan contar con DMD para plantaciones de *E. grandis*. Este hecho representa una oportunidad para explorar estas alternativas para la planificación

¹ Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA) - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales - Universidad Nacional de La Plata. dmartinsandoval@gmail.com



de la silvicultura de esta especie con más de 130.000 ha forestadas en la provincia de Entre Ríos (SDFI y LISEA, 2017).

El objetivo de este trabajo fue elaborar un diagrama de manejo de la densidad para plantaciones de *Eucalyptus grandis* ubicados en diferentes zonas de la provincia de Entre Ríos que permita planificar en forma más o menos sencilla opciones silvícolas para el manejo de estas plantaciones. Adicionalmente, y a modo de ejemplo, se desarrollan tres opciones silviculturales de posible aplicación en la zona.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la construcción del DMD se utilizó un subconjunto de parcelas de la base de datos proveniente del Inventario Forestal Permanente de los Bosques Implantados para la provincia de Entre Ríos del año 2017 (SDFI y LISEA, 2017) constituido por 174 parcelas de muestreo de 500 m² instaladas en plantaciones de *E. grandis* con diferentes métodos de repoblación (plantación o rebrote), de edad conocida y distribuidas geográficamente en los departamentos de Federación, Concordia, Colón, San Salvador, Concepción del Uruguay y Gualeguaychú. En estas parcelas se relevaron para cada árbol el diámetro a la altura del pecho (cm), la altura total (m), el número de árboles (arb/ha), el número fustes (ind/ha) y la condición (vivo/muerto). Un número indeterminado de estas parcelas presentó raleos.

A partir de estas variables se calculó la altura media de los árboles dominantes (AMD; m) (Assmann, 1970), el volumen total con corteza de los árboles individuales (VTCC, m³) con la ecuación propuesta por Fassola et al. (2006), el diámetro cuadrático medio (DQ, cm) y si presenta o no mortalidad (Si/No). La densidad relativa de los rodales se determinó mediante el índice de densidad de rodal (IDR) asumiendo el valor propuesto para la pendiente de -1,605 (Reineke, 1933).

Estructura de los modelos y análisis estadístico

El procesamiento de los datos y los diferentes ajustes se realizaron en R (R Core Team, 2023).

Para determinar la línea de IDR máximo se calculó el IDR de todos los rodales analizados (n = 174) y se seleccionaron aquellos cuyo valor fue superior al 60% del valor máximo de los IDR (n = 45). Con este subconjunto de rodales se ajustó un modelo de regresión cuantílica utilizando el paquete *quantreg* (Koenker, 2023). El modelo se ejecutó con el comando *rq* (*quantile regression*), configurado con un parámetro *tau* de 0,9, obteniendo así los valores de la ordenada al origen (*a*) y la pendiente (*b*).

$$\log(N) = a - b * \log(DQ) \text{ [Ecuación 1]}$$

Donde: *log*: logaritmo en base 10; *N*: número de fustes (ind/ha); *DQ*: diámetro cuadrático medio (cm); *a*, *b*: parámetros

A partir de la línea que representa el límite de mortalidad densodependiente (*IDR_{Max}*) se definieron dos límites adicionales: el límite superior de existencias en crecimiento correspondiente al 60% del valor del máximo IDR (Dean y Baldwin, 1993) que se denominó *IDR₆₀* y el límite inferior que permite una ocupación adecuada del sitio (Long, 1985) calculado como el 30% del IDR máximo (*IDR₃₀*). La zona definida entre el *IDR₆₀* y el *IDR₃₀* se denominó “banda de manejo” y representa los límites entre los cuales se circunscriben los regímenes silvícolas atendiendo a las restricciones de óptimo crecimiento y ocupación del sitio.

$$IDR_{max} = 10^a * DQr^b ; IDR_{60} = 0,6 * IDR_{max} ; IDR_{30} = 0,3 * IDR_{max} \text{ [Ecuación 2]}$$

Donde: *IDR*: índice de densidad de rodal (ind/ha); *Max*, *60*, *30*: máximo, 60% y 30%; *Dqr*: diámetro cuadrático de referencia (25 cm); *a*: ordenada al origen; *b*: pendiente

Para calcular cada punto dentro del DMD se utilizaron el conjunto de ecuaciones típicas propuestas por Reineke (1933) y sus diferentes expresiones que relacionan el diámetro cuadrático medio, el número de individuos y el IDR (Long, 1985).

$$IDR = N * \left(\frac{DQr}{DQ}\right)^b ; N = \frac{IDR}{\left(\frac{DQ}{DQr}\right)^b} ; DQ = DQr * \left(\frac{N}{IDR}\right)^{(1/b)} \text{ [Ecuación 3]}$$

Donde: *IDR*: índice de densidad de rodal (ind/ha); *N*: número de fustes (ind/ha); *DQ_i*: diámetro



cuadrático medio de referencia (25 cm); DQ : diámetro cuadrático medio (cm); b : valor de pendiente ajustada (adimensional)

Para graficar el DMD se utilizó el paquete *ggplot2* (Wickham, 2016) con los ejes x (DQ) e y (N) en escala logarítmica y con las líneas de IDR calculadas (IDR_{Max} , IDR_{60} e IDR_{30}). Adicionalmente se graficaron cada uno de los rodales que fueron utilizados para la construcción del DMD indicando si se observó o no mortalidad según registro de los individuos muertos en cada parcela.

Complementariamente a la información básica del DMD se ajustó un modelo logarítmico que permite predecir el volumen total a partir de las variables estructurales DQ , N y AMD .

$$\log(VTCC) = i + a * \log(DQ) + b * \log(AMD) + c * \log(N) \text{ [Ecuación 4]}$$

Donde: \log : logaritmo en base 10; $VTCC$: volumen total con corteza (m^3/ha); DQ : diámetro cuadrático medio (cm); AMD : altura media dominante (m); N : número de fustes (ind/ha); i , a , b , c : parámetros

Para la determinación de los parámetros del modelo se utilizó el paquete *systemfit* (Henningsen y Hamann, 2007) el cual permite el ajuste simultáneo de un sistema lineal de ecuaciones. Como parámetros se utilizó el método "SUR" (*Seemingly Unrelated Regressions*) con un número máximo de iteraciones (*maxiter*) de 1000. A partir de este modelo se calcularon las isóneas de volumen de 50, 100, 200 y 300 m^3/ha mediante el antilogaritmo de la ecuación 4.

Regímenes silvícolas propuestos

Se definieron tres regímenes diferentes con igual densidad inicial de plantación (1000 ind/ha): uno típicamente para la producción madera para triturado y sin raleos (RS1), otro para la producción de rollizos para aserrado con un raleo sistemático (RS2) y un último con un raleo por lo bajo (RS3). Se asumió que el método de raleo aplicado tiene un efecto diferencial sobre la masa remanente. En el raleo sistemático se mantiene el mismo DQM antes y después de la intervención, en cambio en el raleo por lo bajo, se consideró un aumento del 10% el DQM de los individuos remanentes debido a que se extraen los individuos de menor DAP. Para calcular el volumen resultante de cada intervención se utilizó la ecuación 4 con los parámetros obtenidos del ajuste del modelo y considerando una AMD de 25 m.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se presentan los valores principales de las variables estructurales utilizadas para la construcción del DMD.

Cuadro 1. Valores medios de las variables estructurales de los rodales de *E. grandis* utilizados para la construcción del DMD ($n = 174$).

Método de repoblación	n	Edad (años)	Número de fustes (ind/ha)	AMD (m)	DQ (cm)	IDR (ind/ha)
Rebrote	56	7,1 (3,2)	850 (335)	24,3 (6,5)	16,5 (4,0)	426,5 (173,5)
Plantación	118	7,8 (3,1)	733 (186)	25,5 (6,9)	18,3 (4,6)	437,0 (157,9)

Los valores entre paréntesis corresponden al desvío estándar.

Los parámetros básicos del DMD (ecuación 1) fueron 4,862 y -1,403 para la ordenada al origen (a) y el valor de pendiente ajustada (b) respectivamente y un IDR_{Max} calculado de 795 ind/ha (ecuación 2). Este valor es inferior al valor de IDR observado en la bibliografía. Por ejemplo, en la plataforma PlaForNEA (Keller et al., 2017) para *E. grandis* en la zona Concordia (1000 ind/ha, IS: 25 y sin raleos) se observa mortalidad densodependiente a los 19 años (IDR: 536) lo que representa un IDR_{Max} de 893. Para el caso de plantaciones de *E. grandis* en Uruguay se registran valores de IDR máximo de 1200 (Rachid-Casnati et al., 2022). Sin embargo, los resultados presentados en este trabajo se consideran representativos del estado actual de las plantaciones de *E. grandis* dada la amplitud de situaciones relevadas en el inventario. También se puede observar que un número importante de rodales se encontraría en condiciones de ser raleados (en zona superior al 60% del IDR_{max}) para mejorar su condición de crecimiento (Gráfico 1). Asimismo, en función de la identificación del método de repoblación (rebrote o plantación) se podría asumir la presencia de parcelas de primera rotación con



mayores edades o bien un menor crecimiento en los rodales provenientes de rebrote.

El DMD se presenta en Gráfico 1 con sus líneas de IDR características, las trayectorias para los diferentes regímenes silvícolas y las isóneas de volumen total.

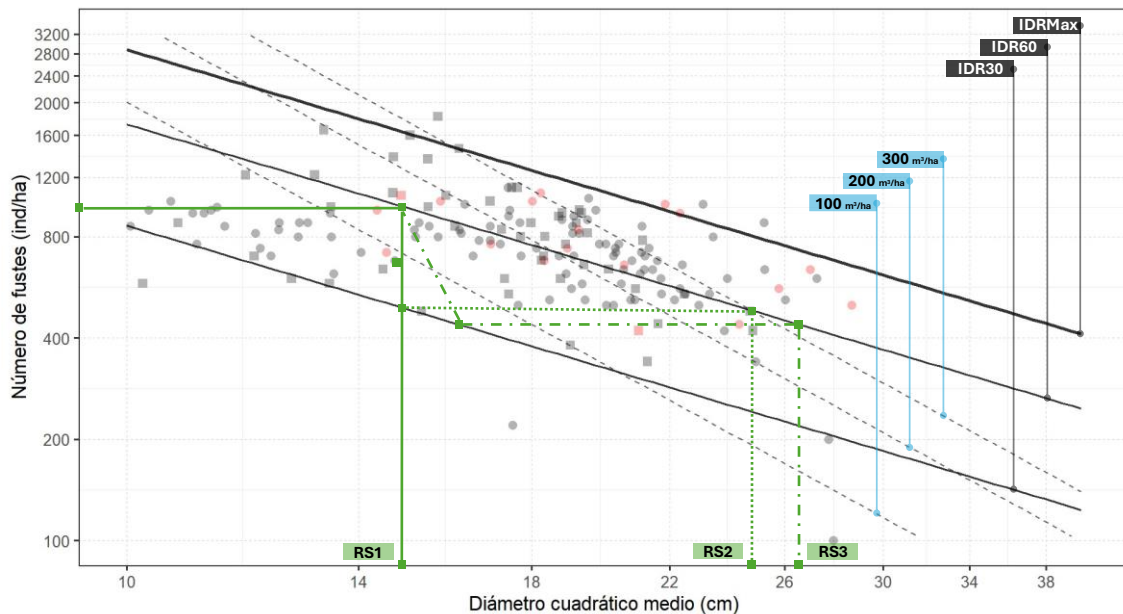


Gráfico 1. Diagrama de manejo de la densidad para rodales de *Eucalyptus grandis* en la provincia de Entre Ríos mostrando las trayectorias para cada régimen silvícola propuesto. Cada punto indica si es plantación (círculo) o rebrote (cuadrado) y si presenta mortalidad o no (rojo o gris, respectivamente)

El modelo de VTCC (ecuación 4) tuvo un muy buen ajuste en términos de R^2 (0,996) con todos los parámetros significativos ($p\text{-value} < 2,22e-16$) y valores de -4,4203021, 2,2505967, 0,6874920 y 1,0091808 para i , a , b y c , respectivamente.

Los valores de DQ y rendimientos obtenidos en el ejemplo de intervenciones (Cuadro 1) son valores razonables y aproximados a los informados en la bibliografía. Lo que subyace en las diferentes trayectorias de intervención o regímenes silvícolas (Gráfico 1) es que para lograr esos valores de DQ y rendimiento es necesario diferentes tiempos de realización y diferentes rotaciones. La herramienta del DMD solo representa una relación dimensional entre densidad y el tamaño de los árboles, expresado a través del DQ.

Cuadro 1. Valores resultantes de la aplicación del DMD para los diferentes regímenes silvícolas propuestos.

Régimen silvícola	Raleo (ind/ha)	DQ raleo (cm)	Raleo (m³/ha)	DQ reman. (cm)	Cosecha (ind/ha)	DQ cosecha (cm)	Cosecha (m³/ha)	Cosecha + raleo (m³/ha)
RS1	0	-	-	14,7	1000	14,7	156,8	156,8
RS2	498	14,7	81,5	14,7	502	24,1	238,0	319,5
RS3	562	13,2	68,8	16,2	438	26,6	259,0	327,8

4. CONCLUSIONES

Los DMD han demostrado ser una herramienta útil para la definición de regímenes silvícolas o planes de intervención en los rodales de una manera sencilla habiendo definido claramente los objetivos de la producción bajo el criterio de mantener el rodal dentro de límites de densidad que aseguren altos rendimientos. El DMD aquí presentado continúa en desarrollo con nueva información, por ejemplo, la incorporación mediante curvas de altura media dominante e índices de sitio la posibilidad de estimación de los momentos en los cuales resultaría oportuno realizar las intervenciones, raleos y corta final.



AGRADECIMIENTOS

A la Subsecretaría de Desarrollo Foresto Industrial de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación por el aporte de los datos del inventario de plantaciones forestales de Entre Ríos y especialmente al técnico regional Ing. Forestal Mario Flores Palenzona.

5. BIBLIOGRAFÍA

- CASTEDO-DORADO, F.; CRECENTE-CAMPO, F.; ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, P.; BARRIO-ANTA, M. 2009. Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 82 (1): 1-16. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpm032>
- DEAN, T.; BALDWIN, V. 1993. Using a density-management diagram to develop thinning schedules for Loblolly pine plantations. Research paper SO-275. USDA, Forest services, Southern forest experiment station. https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/rp/rp_so275.pdf
- FASSOLA, H.; CRECHI, E.; KELLER, A.; BARTH, S.; COSTA, J. 2006. Funciones de volumen total para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden implantado en el NE de la provincia de Entre Ríos, Argentina. 12as Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales – FCF, UNaM – EEA Montecarlo, INTA
- GE, F., ZENG, W., MA, W., MENG, J. 2017. Does the slope of the self-thinning line remain a constant value across different site qualities? An Implication for Plantation Density Management. *Forests* 8(10), 355. <https://doi.org/10.3390/f8100355>
- HENNINGSEN A.; HAMANN J.D. 2007. systemfit: A Package for Estimating Systems of Simultaneous Equations in R. *Journal of Statistical Software* 23(4): 1-40. <https://www.jstatsoft.org/v23/i04/>
- JACK, S.B.; LONG, J.N. 1996. Linkages between silviculture and ecology: an analysis of density management diagrams. *Forest Ecology and Management* 86 (1-3): 205-220. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03770-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03770-X)
- KELLER, A.E.; CRECHI, E.H.; FASSOLA, H.E.; COLCOMBET, L.; BARTH, S.R.; WINCK, R.A.; DI RIENZO, J. 2017. PlaForNEA, Plataforma de Gestión Forestal. INTA EEA Montecarlo. URL <http://www.plafornea.com.ar>
- KOENKER, R. 2023. quantreg: Quantile Regression. R package version 5.95. <https://CRAN.R-project.org/package=quantreg>.
- LONG, J.N. 1985. A practical approach to density management. *Forestry Chronicle* 61: 23–27. <https://pubs.cif-ific.org/doi/pdf/10.5558/tfc61023-1>
- NEWTON, P.F. 1997. Stand density management diagrams: review of their development and utility in stand-level management planning. *Forest Ecology and Management* 98(3): 251-265. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00086-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00086-8)
- R CORE TEAM. 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- RACHID-CASNATI, C.; RESQUIN, F.; HIRIGOYEN, A. 2022. Introducción al uso del Índice de Densidad Relativa para el manejo poblacional de plantaciones de pinos y eucaliptos para usos sólidos. *Revista INIA* 71: 117-120. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/16945/1/INIA-71-diciembre-2022-Rachid.pdf>
- SHAW, J.D.; LONG, J.N. 2007. A density management diagram for longleaf pine stands with application to red-cockaded woodpecker habitat. *Southern Journal of Applied Forestry*. 31(1): 28-38. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/26787>
- SUBSECRETARÍA DE DESARROLLO FORESTO INDUSTRIAL DE LA NACIÓN (SDFI) y LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS ECOLÓGICOS Y AMBIENTALES (LISEA) - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales - UNLP. (2017). Inventario Nacional de Plantaciones Forestales. Inventario Forestal Permanente de los Bosques Implantados. Entre Ríos - Área continental. https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/70444/Documento_completo.pdf-PDFA1b.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- VACCHIANO, G.; MOTTA, R.; LONG, J.N.; SHAW, J.D. 2008. A density management diagram for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): A tool for assessing the forest's protective effect. *Forest Ecology and Management* 255 (7): 2542-2554. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.015>.
- WEISKITTEL, A.; GOULD, P.; TEMESGEN, H. 2009. Sources of variation in the self-thinning boundary line for three species with varying levels of shade tolerance. *Forest Science* 55(1). https://www.fs.usda.gov/pnw/pubs/journals/pnw_2009_weiskittel001.pdf
- WICKHAM, H. 2016. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.