e-ISSN: 2007-4018 / ISSN print: 2007-3828

Scientific article https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2025.11.042

Stocking guide for *Pinus occidentalis* Swartz: an approach based on tree area ratio and crown allometry

Guía de densidad forestal para *Pinus occidentalis* Swartz: enfoque basado en la relación área-árbol y la alometría de copa

Santiago W. Bueno-López[1*]; Luis R. Caraballo-Rojas[1]; Juan G. Torres-Herrera[2]

[1]Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra, Vicerrectoría de Investigación e Innovación. Autopista Duarte km 1.5. A. P. 822. Santiago de los Caballeros, República Dominicana.

[2]Consultores Forestales Serranos. Calle Luis Espinal núm. 2. San José de las Matas, Santiago, República Dominicana.

*Corresponding author: swbueno@gmail.com

Abstract

Introduction. Stand density management is a vital component of sustainable silviculture. For *Pinus occidentalis* Swartz, a pine endemic of Hispaniola and the dominant conifer in the Dominican Republic locally calibrated stocking guides are not available, restricting the use of quantitative thinning and restoration strategies.

Objective. To develop a locally calibrated stocking guide for *P. occidentalis* by deriving the upper self-thinning boundary (A-line) and the lower management boundary (B-line), and to evaluate their implications for stand density management.

Materials and methods. Forest inventory data from natural *P. occidentalis* stands encompassing a wide range of ages, site conditions, and density levels were analyzed. Self-thinning relationships were modeled using stand density and quadratic mean diameter to establish the A-line, while the B-line was set as a fixed proportion of the A-line based on established density-management principles. Model performance was assessed through statistical goodness-of-fit and biological plausibility.

Results. The final A-line model demonstrated a strong and biologically consistent size–density relationship, establishing the upper density limit for *P. occidentalis* stands. The derived B-line provided a practical lower threshold for active stand management. Together, these boundaries defined a density management zone associated with moderate levels of stand occupancy, providing clear criteria to classify stands as overstocked, optimally stocked, or understocked.

Conclusions. This study presents the first locally developed A-line–B-line stocking guide for *P. occidentalis*, providing a quantitative framework to support thinning, restoration, and sustainable management activities in the pine forests of the Dominican Republic.

Keywords: stand density management, maximum stand density, crown width, carrying capacity, self-thinning.

Resumen

Introducción. El manejo de la densidad del rodal es un componente fundamental de la silvicultura sostenible. En el caso de *Pinus occidentalis* Swartz, pino endémico de La Española, en la República Dominicana, no existen guías adaptadas a las condiciones locales, lo que limita la aplicación de estrategias cuantitativas de aclareo y restauración.

Objetivo. Elaborar una guía adaptada a las condiciones locales de *P. occidentalis* mediante la determinación del límite superior de autoaclareo (línea A) y del límite inferior de manejo (línea B) y evaluar sus implicaciones en el manejo de la densidad de los rodales.

Materiales y métodos. Se analizaron datos de inventarios forestales de rodales naturales de *P. occidentalis* que abarcaron edades, condiciones de sitio y niveles de densidad variables. Las relaciones de autoaclareo se modelaron a partir de la densidad del rodal y el diámetro cuadrático medio para definir la línea A, mientras que la línea B se estableció como una proporción fija de esta, con base en principios de manejo de densidad previamente establecidos. El desempeño del modelo se evaluó mediante indicadores estadísticos de ajuste y criterios de plausibilidad biológica.

Resultados. El modelo final de la línea A mostró una relación densidad-tamaño sólida y biológicamente consistente, que establece el límite máximo de densidad para los rodales de *P. occidentalis.* La línea B derivada permitió la identificación de un umbral inferior práctico para el manejo activo. Estos límites definieron una zona de manejo de densidad asociada a niveles moderados de ocupación del rodal, lo que proporciona criterios claros para la clasificación de los rodales (sobrepoblados, con densidad óptima o subpoblados).

Conclusiones. Este estudio presenta la primera guía de densidad basada en las líneas A y B, desarrollada localmente para *P. occidentalis*, la cual proporciona un marco cuantitativo para apoyar las actividades de aclareo, restauración y manejo sostenible de los bosques de pino de la República Dominicana.

Palabras clave: manejo de la densidad del rodal, densidad máxima, ancho de copa, capacidad de carga, autoaclareo.

Please cite this article as follows (APA 7): Bueno-López, S. W., Caraballo-Rojas, L. R., & Torres-Herrera, J. G. (2026). Stocking guide for *Pinus occidentalis* Swartz: an approach based on tree area ratio and crown allometry. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 32,* e25042. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2025.11.042

Received: November 13, 2025 | **Accepted:** May 11, 2026 | **Published online:** July 27, 2026

RCHSCFA

https://revistas.chapingo.mx/forestales

Introduction

Stand density management is a fundamental component of silviculture because it regulates competition for growing space, influences tree growth and mortality, and underpins decisions related to thinning, yield regulation, and stand stability (Burkhart et al., 2018). Stocking guides are widely used tools that synthesize key stand variables—such as stand density, basal area, and quadratic mean diameter—into a graphical framework that supports practical decision-making in forest management (Baral, 2017; Hernández-Martínez et al., 2024). By delineating zones of overstocking, optimal stocking, and understocking, stocking guides help managers evaluate current stand conditions and plan interventions that promote efficient use of site resources (Ray et al., 2023).

The conceptual foundation of stocking guides is rooted in classical size–density relationships, which describe how maximum stand density declines predictably as average tree size increases. Reineke's size–density relationship, expressed through the Stand Density Index (SDI), and Gingrich's stocking charts, based on basal area and stand density remain cornerstone approaches in silviculture (Gingrich, 1967; Reineke, 1933). These methods combine stand density, basal area, and quadratic mean diameter to define upper and lower density boundaries—commonly referred to as A-lines and B-lines—that delineate a density management zone. Subsequent developments have refined these concepts by incorporating biologically meaningful indicators of competition, particularly crown attributes that more directly reflect growing space occupancy (Burkhart et al., 2018).

Modern stocking guides continue to evolve as dynamic tools that integrate empirical data, species-specific relationships, and site conditions, allowing them to adapt to changing environmental and management contexts (Carson et al., 2023). Their standardized and visual format facilitates communication among foresters, landowners, and other stakeholders, improving transparency and consistency in silvicultural planning (Pretzsch, 2009; Ray et al., 2023). Assessing stand density using relative measures derived from size–density theory has become a valuable tool, particularly for guiding thinning intensity, reducing mortality risk, and optimizing growth efficiency across a wide range of forest ecosystems (Looney & Shaw, 2025).

Despite the widespread use of density management diagrams worldwide, species- and region-specific stocking guides remain necessary because self-thinning dynamics, crown architecture, and competitive interactions vary among species and ecological

Introducción

El manejo de la densidad es un componente fundamental de la silvicultura, ya que regula la competencia por el espacio de crecimiento, influye en el crecimiento y mortalidad de los árboles y sustenta las decisiones relacionadas con el aclareo, rendimiento y estabilidad del rodal (Burkhart et al., 2018). Las guías de densidad son herramientas utilizadas ampliamente que integran variables clave del rodal como la densidad, el área basal y el diámetro cuadrático medio en un marco gráfico que facilita la toma de decisiones en el manejo forestal (Baral, 2017; Hernández-Martínez et al., 2024). Al delimitar zonas sobrepobladas, con densidad óptima y subpobladas, las guías permiten la evaluación del estado actual del rodal y la planificación de intervenciones que promuevan el uso eficiente de los recursos del sitio (Ray et al., 2023).

El fundamento conceptual de las guías de densidad se basa en las relaciones clásicas tamaño-densidad, las cuales describen cómo la densidad máxima del rodal disminuye de manera predecible a medida que el tamaño promedio de los árboles aumenta. La relación densidad-tamaño de Reineke, expresada mediante el índice de densidad de Reineke y los diagramas de densidad de Gingrich, sustentados en el área basal y la densidad del rodal, continúan siendo enfoques fundamentales en la silvicultura (Gingrich, 1967; Reineke, 1933). Estos métodos integran la densidad del rodal, el área basal y el diámetro cuadrático medio para definir los límites superior e inferior de densidad, comúnmente denominados líneas A y B, que delimitan una zona de manejo de densidad. Los avances posteriores han perfeccionado estos conceptos mediante la incorporación de indicadores de competencia biológicamente más representativos, en particular atributos de copa que reflejan de manera más directa la ocupación del espacio de crecimiento (Burkhart et al., 2018).

Las guías de densidad modernas continúan evolucionando como herramientas dinámicas que integran datos empíricos, relaciones específicas de cada especie y condiciones de sitio, lo que les permite adaptarse a cambios en las condiciones ambientales y de manejo (Carson et al., 2023). El carácter estandarizado y visual de las guías facilita la comunicación entre silvicultores, propietarios de tierras y otros actores involucrados, mejorando la transparencia y la consistencia en la planificación silvícola (Pretzsch, 2009; Ray et al., 2023). Asimismo, la evaluación de la densidad del rodal a través de medidas relativas derivadas de la teoría tamaño-densidad se ha convertido en una herramienta útil especialmente para orientar la intensidad de los aclareos, reducir el riesgo de mortalidad y optimizar la eficiencia del crecimiento en una variedad amplia de bosques (Looney & Shaw, 2025).

conditions (Yang & Brandeis, 2022). *Pinus occidentalis* Swartz, an endemic conifer of Hispaniola and the dominant species in the montane pine forests of the Dominican Republic, plays a critical ecological and silvicultural role. These forests are characterized by relatively open understories with limited herbaceous cover (*Melinis minutiflora* P. Beauv., *Parthenium hysterophorus* L., and *Cyathea* spp.) and scattered shrubs (*Eysenhardtia polystachya* [Ortega] Sarg. and *Pithecellobium unguis-cati* L. Benth), reflecting the strong influence of canopy structure on resource availability (Bueno-López et al., 2024). Although *P. occidentalis* is a key species for conservation, restoration, and sustainable forest management initiatives in the region, no locally calibrated stocking guide currently exists for this species (Bueno-López et al., 2024). This situation limits the application of quantitative, science-based density management in Dominican pine forests.

The objective of this study was to develop a species-specific stocking guide for *P. occidentalis* in La Sierra, Dominican Republic, by defining the upper density boundary using a tree area ratio model and the lower management threshold using crown–diameter allometry and integrating these boundaries into a practical stocking chart for silvicultural decision-making.

We hypothesized that: (H1) the maximum stand density of *P. occidentalis* follows a predictable size–density relationship that can be quantified using a tree area ratio model; and (H2) crown–diameter allometry of open-grown trees defines a biologically meaningful lower density threshold corresponding to crown closure and effective site occupancy.

Materials and methods

The study was conducted in La Sierra, Dominican Republic, located in the north-central portion of the Cordillera Central between UTM coordinates 251748 m E - 325795 m E and 2116888 m N - 2156996 m N, (Figure 1). The region covers an area of approximately 1 800 km^2. Its climate varies with elevation, ranging from low montane to montane conditions and from humid to very humid environments. Elevations range from 500 to 1 600 m above sea level. Although rainfall is irregular, precipitation maintains relatively stable soil moisture levels for a large part of the year. Mean annual precipitation ranges from 800 mm to 1 600 mm, while mean annual temperature is approximately 24 °C (Bueno-López et al., 2024). Pine forests occurring at higher elevation develop on shallow, carbonate, lateritic, low-productivity soils, primarily on rugged terrain. More than 90 % of the region is mountainous, with slopes ranging from 0 % to 70 %.

Aunque los diagramas de manejo de densidad se utilizan en todo el mundo, aún es necesario desarrollar guías de densidad específicas para cada especie y región, debido a que la dinámica de autoaclareo, la arquitectura de copa y las interacciones competitivas varían entre especies y condiciones ecológicas (Yang & Brandeis, 2022). *Pinus occidentalis* Swartz, conífera endémica de La Española y especie dominante en los bosques montanos de pino de la República Dominicana, desempeña un papel ecológico y silvícola fundamental. Estos bosques se caracterizan por presentar sotobosques relativamente abiertos, con cobertura herbácea limitada (*Melinis minutiflora* P. Beauv., *Parthenium hysterophorus* L., y *Cyathea* spp.) y arbustos dispersos (*Eysenhardtia polystachya* [Ortega] Sarg. y *Pithecellobium unguis-cati* L. Benth), lo que refleja la fuerte influencia de la estructura del dosel sobre la disponibilidad de recursos (Bueno-López et al., 2024). Aunque *P. occidentalis* es una especie clave para las iniciativas de conservación, restauración y manejo sostenible de los bosques de la región, actualmente no existe una guía de densidad adaptada a las condiciones locales de esta especie (Bueno-López et al., 2024). Esta situación limita la aplicación de estrategias cuantitativas de manejo de la densidad basadas en evidencia científica en los bosques de pino de la República Dominicana.

El objetivo de este estudio fue desarrollar una guía de densidad específica para *P. occidentalis* en La Sierra, República Dominicana, definiendo el límite superior de densidad a partir de un modelo de relación área-árbol y del umbral inferior de manejo mediante la alometría copa-diámetro. Ambos límites se integraron en un diagrama práctico para la toma de decisiones silvícolas.

Las hipótesis planteadas fueron las siguientes: (H1) la densidad máxima del rodal de *P. occidentalis* sigue una relación predecible entre tamaño y densidad que puede cuantificarse mediante un modelo de relación área-árbol; y (H2) la alometría copa-diámetro de árboles de crecimiento abierto define un umbral inferior de densidad biológicamente significativo, que corresponde con el cierre de copas y a la ocupación efectiva del sitio.

Materiales y métodos

El estudio se hizo en La Sierra, República Dominicana, ubicada en la parte centro-norte de la Cordillera Central, entre las coordenadas UTM 251748 m E - 325795 m E y 2116888 m N - 2156996 m N (Figura 1). La región abarca una superficie aproximada de 1 800 km^2. Su clima varía según la altitud con condiciones que van de montano bajo hasta montano y de húmedo a muy húmedo. La altitud oscila entre 500 y 1 600 m. Aunque las lluvias son irregulares, las precipitaciones mantienen niveles de humedad edáfica relativamente estables durante gran parte del año. La precipitación media anual varía entre

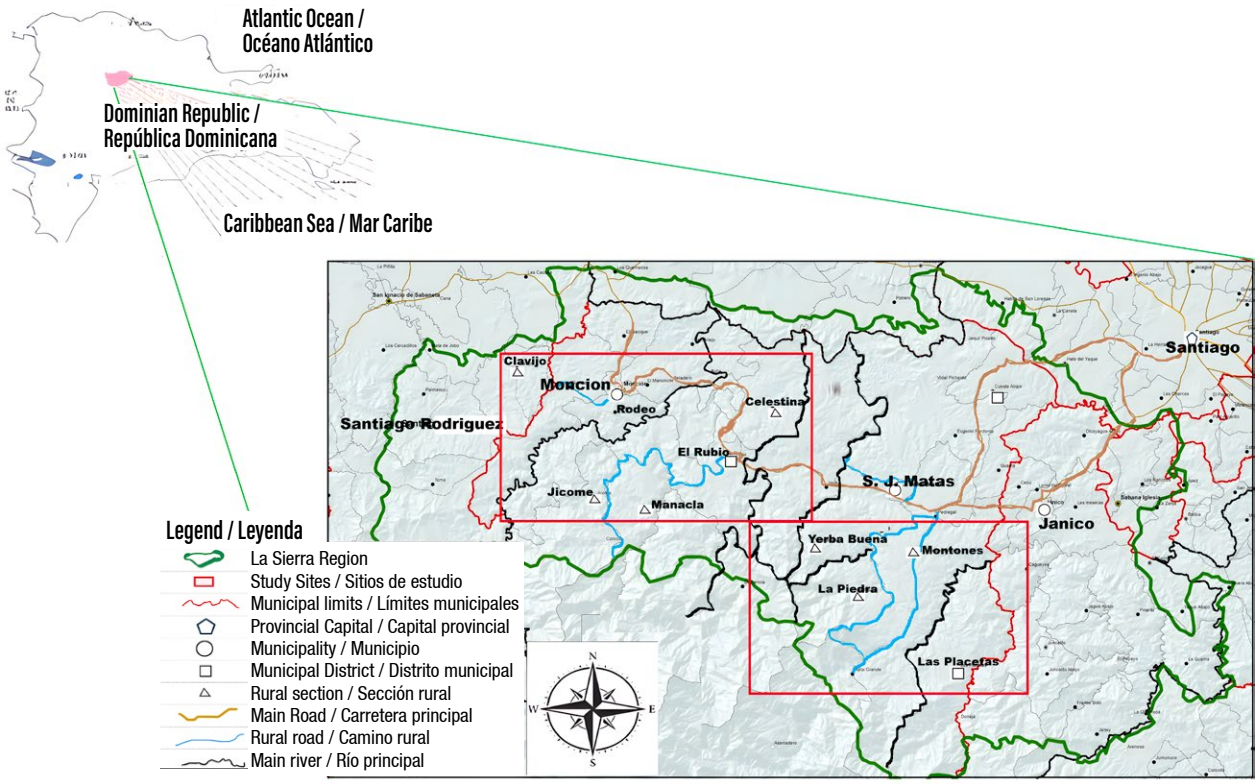

Figure 1. Location of La Sierra region in the Dominican Republic, where the species-specific stocking guide for *Pinus occidentalis* was developed.

Figura 1. Ubicación de la región de La Sierra en la República Dominicana, donde se desarrolló la guía de densidad específica para *Pinus occidentalis*.

Soils are predominantly sandy in texture, although higher proportions of clay and silt can be observed in some places. They are usually well drained, and soil fertility tends to increase in areas where the surface remains protected by vegetation.

Descriptive statistics of the stand attributes used to develop the stocking guide for *P. occidentalis* are presented in Table 1. These values summarize the structural conditions of the sample plots in La Sierra and providing the empirical basis for defining the A-line and B-line boundaries of the stocking chart.

To create the stocking chart for *P. occidentalis* in La Sierra, we followed the methodological framework proposed by Halligan and Nyland (1999) for developing a relative density guide for *Picea abies* (L.) H. Karst. Their method was based on the foundational works of Gingrich (1967) and Krajicek et al. (1961), who established the fundamental principles of stand density relationships and relative density guides. This approach integrates tree size, stand density, and basal area in a biological consistent way, enabling clear definitions of optimal stocking, understocking, and overstocking thresholds.

800 mm y 1 600 mm, mientras que la temperatura media anual es de aproximadamente 24 °C (Bueno-López et al., 2024). Los bosques de pino localizados en las zonas de mayor altitud se desarrollan sobre suelos poco profundos, carbonatados, lateríticos y de baja productividad, principalmente en terrenos con topografía accidentada; más del 90 % del área es montañosa y presenta pendientes que oscilan entre 0 y 70 %.

Los suelos presentan predominantemente textura arenosa, aunque en algunos sitios se observan proporciones mayores de arcilla y limo. En general, son suelos bien drenados y la fertilidad tiende a incrementar en áreas donde la superficie permanece protegida por la vegetación.

El Cuadro 1 muestra las estadísticas descriptivas de los atributos del rodal para el desarrollo de la guía de densidad de *P. occidentalis*. Estos valores resumen las condiciones estructurales de las parcelas de muestreo en La Sierra y constituyen la base empírica para definir los límites de las líneas A y B del diagrama de densidad.

El diagrama de densidad de *P. occidentalis* en La Sierra se obtuvo mediante el uso del marco metodológico que Halligan y Nyland (1999) desarrollaron para la

Table 1. Descriptive statistics of stand structural attributes used to develop the stocking guide for *Pinus occidentalis* in La Sierra, Dominican Republic.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de los atributos estructurales del rodal utilizados para el desarrollo de la guía de densidad de *Pinus occidentalis* en La Sierra, República Dominicana.

Chart attribute / Componente del diagrama	n	Variables	Mean / Media	SD / DE	Minimum / Mínimo	Maximum / Máximo
A-Line / Línea A (límite superior de densidad)	52*	Mean DBH (cm) / DAP promedio(cm)	22.89	6.68	10.33	38.86
		Quadratic mean diameter (cm) / Diámetro cuadrático medio (cm)	23.97	6.73	11.27	39.67
		Stand density (trees·ha^{-1}) / Densidad del rodal (árboles·ha^{-1})	884	462	400	2 400
		Stand basal area (m^2·ha^{-1}) / Área basal del rodal (m^2·ha^{-1})	35.80	14.86	16.95	82.70
B-Line / Línea B (límite inferior de densidad)	30**	Crown width (m) / Ancho de copa (m)	9.47	1.68	6.90	12.55
		Mean DBH (cm) / DAP promedio (cm)	40.24	8.20	23.00	57.90

*Plots; **Open-grown trees. DBH: diameter at breast height, SD: Standard deviation.

*Parcelas; **árboles de crecimiento abierto. DAP: diámetro a la altura del pecho, DE: desviación estándar.

We examined the quantitative relationships among stand density, tree size, and basal area. The use of this method allowed the development of as stocking chart for *P. occidentalis* in a consistent manner and in accordance with widely accepted methodologies, making it easier to compare with stocking guides developed for other species and forest types.

The A-line, representing the upper density boundary, was derived from 52 plots characterized by relatively small tree diameters, typical of high-density stand conditions. Permanent sample plots consisted of fixed-area plots measuring 25 m × 25 m (equivalent to 0.0625 ha) and were established in even-aged *P. occidentalis* stands ranging from 25 to 35 years of age. Plot size was selected to adequately represent stand structure and variability in stand density, diameter distribution, and crown dimensions throughout the study area. Plots were distributed using a stratified sampling approach to represent the diversity of conditions present in *P. occidentalis* forests. Candidate stands were selected based on species dominance, even-aged structure, and accessibility. Within each stand, plot locations were carefully chosen to avoid edge effects and local disturbances, ensuring that measurements reflected prevailing stand conditions. For each plot, the following variables were recorded or derived: Stand density (N, trees·ha^{-1}), sum of diameters at breast height (SUMD, cm), sum of squared diameters (SUMDD, cm^2), basal area (m^2·ha^{-1}), and quadratic mean diameter (QMD, cm). Basal area (BA) was calculated as:

$$BA = [\pi / (4 \times 10\,000)] \times N \times QMD^2$$

elaboración de una guía de densidad relativa de *Picea abies* (L.) H. Karst. Su método se basó en los trabajos de Gingrich (1967) y Krajicek et al. (1961), quienes establecieron los principios básicos de las relaciones de densidad del rodal y de las guías de densidad relativa. Este enfoque integra el tamaño de los árboles, la densidad y el área basal de manera biológicamente consistente, lo que permite definir con claridad los umbrales de densidad óptima, densidad insuficiente y densidad excesiva.

Se analizaron las relaciones cuantitativas entre la densidad del rodal, el tamaño de los árboles y el área basal. El uso de este método permitió el desarrollo del diagrama de densidad de *P. occidentalis* de manera consistente y conforme con metodologías aceptadas ampliamente, facilitando su comparación con guías de densidad elaboradas para otras especies y tipos de bosque.

La línea A, que representa el límite superior, se determinó a partir de 52 parcelas caracterizadas por árboles de diámetros relativamente pequeños, típicos de condiciones con densidad elevada. Las parcelas permanentes de muestreo tuvieron un área fija de 25 m × 25 m (equivalente a 0.0625 ha) y se establecieron en rodales coetáneos de *P. occidentalis* (entre 25 y 35 años). El tamaño de las parcelas se seleccionó para representar adecuadamente la estructura del rodal y la variabilidad en la densidad, la distribución diamétrica y las dimensiones de copa a lo largo del área de estudio. Las parcelas se distribuyeron mediante un enfoque estratificado con el fin de representar la diversidad de condiciones presentes en los bosques de *P. occidentalis*. Los rodales candidatos se seleccionaron con base en la

From this dataset, the A-line, also known as the maximum average density line (Gingrich, 1967), was calculated using the Tree Area Ratio (TAR) regression model:

$$TAR = \beta_0 N + \beta_1 SUMD + \beta_2 SUMDD$$

The mean diameter at breast height (DBH) was 22.89 cm, and the QMD was 23.97 cm. Mean stand density was 884 trees·ha^{-1}, ranging from 400 to 2 400 trees·ha^{-1}, while mean basal area was 35.80 m^2·ha^{-1}, with values ranging from 16.95 to 82.70 m^2·ha^{-1}. These values reflect the broad structural variability of stands under conditions approaching maximum site occupancy.

Additionally, a supplementary dataset of 30 open-grown trees (25 and 30 years of age) was used to construct the Maximum Crown Occupancy (MCO) line, also known as the minimum density line (Krajicek et al., 1961), hereafter referred to as the B-line. For each tree, DBH and crown width (m) were measured to analyze the crown–diameter relationship and derive the B-line from crown allometric relationships linking crown width to DBH. Mean crown width was 9.47 m, ranging from 6.90 to 12.55 m, whereas mean DBH was 40.24 cm, with values ranging from 23.00 to 57.90 cm.

Construction of the A-line and B-line

The upper boundary of maximum stand density (A-line) was estimated using the Tree Area Ratio (TAR) regression model:

$$TAR = \beta_0 N + \beta_1 SUMD + \beta_2 SUMDD$$

where TAR represents the average growing space per tree (m^2·tree^{-1}), SUMD is the sum of tree diameters at breast height (cm), and SUMDD is the sum of squared diameters (cm^2). Model coefficients were estimated from plot-level inventory data, and predictions were generated for QMD values ranging from 12 to 48 cm. By setting N= 1, stand density was calculated as:

$$TPH = 1\,000 / TAR$$

where N is the number of trees per hectare. Basal area (BA, m^2·ha^{-1}) was then calculated for each assumed QMD as:

$$BA = 0.00007854 * TPH * QMD^2$$

The B-line was derived from crown–diameter relationships. First, a linear regression was fitted between crown width (CW, m) and tree diameter (D, cm):

$$CW = \alpha_0 + \alpha_1 D$$

dominancia de la especie, la estructura coetánea y la accesibilidad. Dentro de cada rodal, la ubicación de las parcelas se definió cuidadosamente para evitar efectos de borde y perturbaciones locales, garantizando que las mediciones reflejaran las condiciones predominantes del rodal. Para cada parcela se registraron o derivaron las siguientes variables: densidad del rodal (N, árboles·ha^{-1}), suma de diámetros a la altura del pecho (DAP, cm), suma de diámetros cuadrados (SUMDD, cm^2), área basal (m^2·ha^{-1}) y diámetro cuadrático medio (DCM, cm). El área basal (AB) se calculó de la siguiente manera:

$$AB = [\pi / (4 \times 10\,000)] \times N \times DCM^2$$

A partir de este conjunto de datos se estimó la línea A, también conocida como línea de densidad promedio máxima (Gingrich, 1967), mediante el modelo de regresión de la relación área-árbol (RAA):

$$RAA = \beta_0 N + \beta_1 SUMD + \beta_2 SUMDD$$

El diámetro normal promedio (DAP) fue 22.89 cm y el DCM, 23.97 cm. La densidad promedio fue 884 árboles·ha^{-1} con valores entre 400 y 2 400 árboles·ha^{-1}, mientras que el área basal promedio fue 35.80 m^2·ha^{-1}, con un mínimo de 16.95 y un máximo de 82.70 m^2·ha^{-1}. Estos valores reflejan la amplia variabilidad estructural de los rodales bajo condiciones cercanas a la máxima ocupación del sitio.

Por otra parte, se utilizó un conjunto de datos complementario de 30 árboles de crecimiento abierto (de 25 y 30 años) para construir la línea de ocupación de la copa máxima (OCM), también conocida como línea de densidad mínima (Krajicek et al., 1961), denominada en este estudio como línea B. Para cada árbol se midieron el diámetro normal y el ancho de copa (m) con el fin de analizar la relación copa-diámetro y derivar la línea B a partir de relaciones alométricas de copa que vincula el ancho de copa con el DAP. El ancho de copa promedio fue 9.47 m con un intervalo de 6.90 a 12.55 m, mientras que el DAP promedio fue 40.24 cm con un rango de 23.00 a 57.90 cm.

Construcción de las líneas A y B

El límite superior de densidad máxima del rodal (línea A) se estimó mediante el modelo de relación área-árbol (RAA):

$$RAA = \beta_0 N + \beta_1 SUMD + \beta_2 SUMDD$$

donde RAA representa el espacio medio de crecimiento por árbol (m^2·árbol^{-1}), SUMD es la suma de los diámetros a la altura del pecho (cm) y SUMDD es la suma de los diámetros cuadrados (cm^2). Los coeficientes del modelo se estimaron a partir de datos de inventario a nivel de

Maximum crown Occupancy (MCO), expressed as a percentage of one hectare, was estimated as:

$$MCO = [\pi / (4 * 100)] * CW^2 \approx 0.00785398CW^2$$

Substituting the fitted crown–diameter regression, MCO was expressed as:

$$MCO = 0.00785398 (\alpha_0 + \alpha_1 D)^2$$

For each QMD value, stand density was estimated as N = 100 / MCO, and basal area was recalculated following the procedure described above. The predicted values obtained from these procedures defined the A-line (full site occupancy line) and B-line (MCO occupancy line), which together delineate the upper and lower density boundaries of the *P. occidentalis* stocking chart.

Stocking Chart Construction and Visualization

The predicted values of N and BA corresponding to each QMD were used to construct the stocking chart. The A-line was plotted as the upper boundary, representing the maximum size–density relationship, while the B-line was established as the lower boundary, indicating the management threshold. Both lines were plotted with N on the x-axis and BA on the y-axis, providing a visual framework for assessing stand density in *P. occidentalis* stands. This chart serves as a practical tool for identifying overstocked and understocked conditions and for guiding silvicultural interventions throughout the species' natural range in La Sierra.

Analyses were carried out using IBM SPSS Statistics (version 27; IBM Corp., 2020) and Microsoft Excel (Microsoft Corporation, 2018). These software platforms provided the tools necessary to generate descriptive statistics and regression models, and to organize stand-level datasets for the development of stocking guide.

Results and discussion

Stands with high densities and small QMD values (≈11–13 cm; >2 000 trees·ha^{-1}) reached only moderate basal areas (≈25-30 m^2·ha^{-1}). In contrast, lower-density stands (≈400-800 trees·ha^{-1}) with larger trees (QMD 30-35 cm) accumulated much greater basal areas (60-80 m^2·ha^{-1}). The TAR regression explained 90 % of the variation (Adj. R^2 = 0.90). Although individual predictors were not statistically significant due to multicollinearity, the model as a whole provided a strong fit. This is expected since SUMD and SUMDD are mathematically related to N. In practical terms, the A-line defines an empirical boundary of maximum stand occupancy rather than evaluating the independent effects of individual predictors.

These results support Hypothesis 1 (H1), which suggests that the maximum stand density of *P. occidentalis* parcela y las predicciones se realizaron para valores de DCM entre 12 y 48 cm. Al establecer N = 1, la densidad del rodal se calculó de la siguiente manera:

$$N = 1\,000 / RAA$$

donde N corresponde al número de árboles por hectárea. Posteriormente, el área basal (AB, m^2·ha^{-1}) se calculó para cada valor asumido de DCM de la siguiente manera:

$$AB = 0.00007854 * N * DCM^2$$

La línea B se obtuvo a partir de las relaciones entre copa y diámetro. En primer lugar, se ajustó una regresión lineal entre el ancho de copa (AC, m) y diámetro del árbol (D, cm):

$$AC = \alpha_0 + \alpha_1 D$$

El área máxima de copa (ACM), expresada como porcentaje de una hectárea, se calculó de la siguiente manera:

$$ACM = [\pi / (4 * 100)] * dc^2 \approx 0.00785398dc^2$$

Tras sustituir la regresión ajustada entre copa y diámetro, ACM se expresó como:

$$ACM = 0.00785398 (\alpha_0 + \alpha_1 D)^2$$

Para cada valor de DCM, la densidad del rodal se estimó como N = 100 / ACM y el área basal se recalculó conforme al procedimiento descrito anteriormente. Los valores predichos obtenidos mediante estos procedimientos definieron la línea A (línea de ocupación total del sitio) y la línea B (línea de ocupación de ACM), las cuales delimitan conjuntamente los límites superior e inferior de densidad en el diagrama de densidad de *P. occidentalis*

Elaboración y visualización del diagrama de densidad

Los valores predichos de N y AB correspondientes a cada valor de DCM se utilizaron para crear el diagrama de densidad. La línea A se representó como el límite superior, describiendo la relación máxima entre densidad y tamaño, mientras que la línea B se estableció como el límite inferior, indicando el umbral de manejo. Ambas líneas se trazaron con N en el eje x y AB en el eje y, proporcionando un marco visual para evaluar la densidad de los rodales de *P. occidentalis.* Este diagrama funciona como una herramienta práctica para la identificación de condiciones de sobrepoblación y subpoblación, así como para la orientación de intervenciones silvícolas dentro del área de distribución natural de la especie en La Sierra.

follows a predictable size–density trajectory that can be modeled using a Tree Area Ratio (TAR) relationship. The observed boundary pattern confirms that stand structural constraints are determined primarily by limitations in growing space rather than independent predictor effects. Although the individual coefficients were not statistically significant; the overall pattern is consistent with classical size–density theory and supports the use of TAR as a useful tool for estimating biological carrying capacity. The crown–diameter regression (Table 2) showed a strong positive linear relationship, with both the intercept and slope highly significant. Diameter explained approximately 58 % of the variation in crown width. On average, a 10 cm increase in DBH resulted in a crown width increase of 1.58 m.

While the three independent variables in the A-line model were not individually significant (Table 2), this result should be interpreted within the methodological context of stocking-guide. The A-line acts as an empirical upper boundary of maximum stand density rather than as a model intended to evaluate causal relationships among predictors (Pretzsch, 2009; Reineke, 1933). Since stand variables like stand density, QMD, and basal area are mathematically and biologically interconnected along the size–density trajectory, multicollinearity is expected and may reduce the statistical significance of individual coefficients. Therefore, the model was primarily on the basis of its overall performance, biological plausibility, and consistency with size–density theory, rather than on the statistical significance of individual parameters.

The scatterplot (Figure 2) shows a positive relationship between stem diameter and crown expansion in the trees used to define the B-line of the stocking guide. Los análisis se hicieron con el *software* IBM SPSS Statistics (versión 27; IBM Corp., 2020) y el programa Microsoft Excel (Microsoft Corporation, 2018). Estas plataformas proporcionaron las herramientas necesarias para obtener estadísticas descriptivas y modelos de regresión y para organizar los conjuntos de datos a nivel de rodal con el fin de elaborar una guía de densidad.

Resultados y discusión

Los rodales con densidad elevada y DCM reducidos (>2 000 árboles·ha^{-1}≈; 11–13 cm) alcanzaron áreas basales moderadas (≈25-30 m^2·ha^{-1}). Por el contrario, los rodales con menor densidad (≈400-800 árboles·ha^{-1}) con árboles más grandes (DCM 30-35 cm) acumularon áreas basales mucho mayores (60-80 m^2·ha^{-1}). La regresión RAA explicó aproximadamente 90 % de la variación observada (R^2 ajustado = 0.90). Aunque los predictores individuales no fueron estadísticamente significativos debido a la multicolinealidad, el modelo en conjunto presentó un ajuste sólido, lo cual era esperado, dado que SUMD y SUMDD están matemáticamente relacionados con N. En términos prácticos, la línea A define un límite empírico de ocupación máxima del rodal, en lugar de evaluar los efectos independientes de los predictores.

Estos resultados respaldan la hipótesis 1 (H1), la cual plantea que la densidad máxima del rodal de *P. occidentalis* sigue una trayectoria tamaño-densidad predecible que puede modelarse mediante una relación área-árbol (RAA). El comportamiento observado de los límites confirma que las restricciones estructurales del rodal están determinadas principalmente por limitaciones del espacio de crecimiento y no por efectos independientes de los predictores. Aunque los coeficientes individuales no fueron estadísticamente significativos, el patrón general concuerda con la teoría clásica tamaño-densidad

Table 2. Parameter estimates and model statistics for the A-line regression model (upper density boundary) and the B-line equation (lower density boundary) relating crown width to diameter in *Pinus occidentalis*.

Cuadro 2. Estimaciones de los parámetros y estadísticas del modelo de regresión de la línea A (límite superior de densidad) y de la ecuación de la línea B (límite inferior de densidad) que relaciona el ancho de copa con el diámetro en *Pinus occidentalis*.

Chart Attribute / Componente del diagrama	Variable	Estimate / Estimación	Std. Error / Error estándar	t	Pr > |t|
A-Line / Línea A	N	0.01635	0.39831	0.04	0.970
	SUMD	0.04030	0.04172	0.97	0.340
	SUMDD	0.00035	0.00093	0.38	0.710
B-Line / Línea B	Intercept / Intercepto	3.09881	1.01541	3.05	0.005
	Diameter / Diámetro	0.15821	0.02474	6.39	<0.001

N: stand density, SUMD: sum of diameters, SUMDD: sum of squared diameters.

N: densidad del rodal, SUMD: suma de diámetros, SUMDD: suma de diámetros cuadrados.

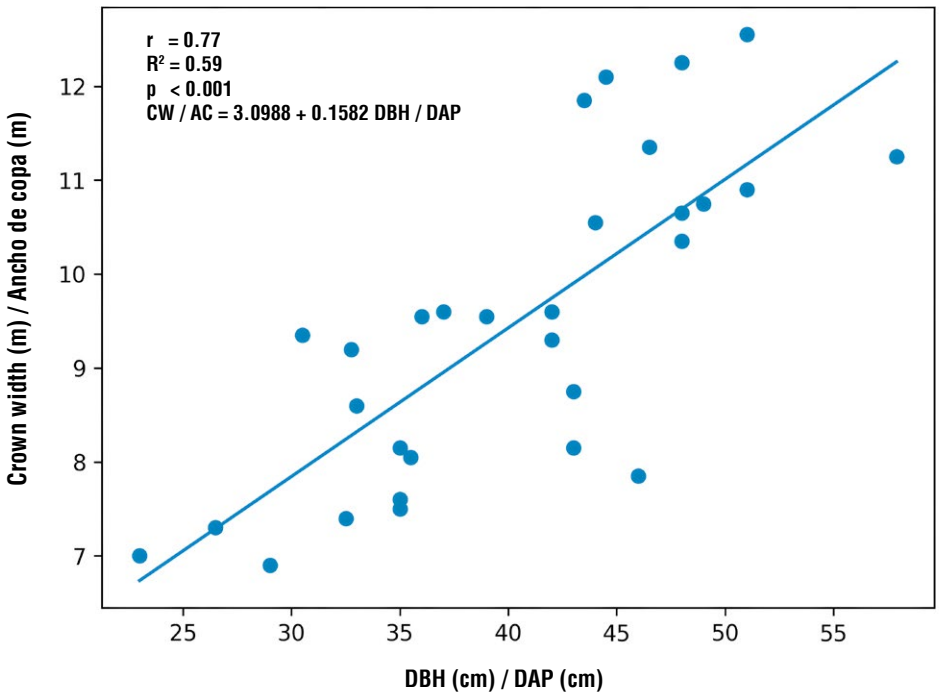

Figure 2. Relationship between diameter at breast height (DBH) and crown width in *Pinus occidentalis*. A strong positive correlation was observed (Pearson's r = 0.77, $p < 0.001$), indicating that crown width increases as stem diameter increases.

Figura 2. Relación entre el diámetro normal (DAP) y el ancho de copa en *Pinus occidentalis*. Se observó una correlación positiva marcada (r de Pearson = 0.77, $p < 0.001$), lo cual indica que el ancho de copa aumenta a medida que lo hace el diámetro del fuste.

As DBH increased, crown width also tended to increase ranging from about 7 m in smaller trees (~25 cm DBH) to more than 12 m in larger diameters (~50-55 cm DBH). This trend reflects how tree size affects crown development under open-grown conditions, where competition is minimal and crowns can expand freely. This relationship provides the empirical basis for estimating maximum crown occupancy and, consequently, the minimum stocking condition (B-line) in the stocking chart for *P. occidentalis*.

This outcome supports Hypothesis 2 (H2), suggesting that the relationship between crown size and diameter in open-grown trees indicates a meaningful lower density threshold linked to crown closure. The positive correlation between DBH and crown width demonstrates the structural capacity of *P. occidentalis* to expand under low-competition conditions, offering a solid basis for estimating the minimum effective stand occupancy. Consequently, the B-line represents a structural transition between underutilized growing space and effective canopy occupancy rather than an arbitrary boundary for management decisions.

Figure 3 presents the diagnostic plots used to evaluate the regression model relating crown width to diameter at breast height (DBH) for the development of the

y respalda el uso de la RAA como una herramienta útil para estimar la capacidad de carga biológica. La regresión copa-diámetro (Cuadro 2) mostró una relación lineal positiva sólida, en la que tanto la ordenada al origen como la pendiente fueron altamente significativas. El diámetro explicó aproximadamente 58 % de la variación en el ancho de copa. En promedio, un incremento de 10 cm en el DAP produjo un aumento de 1.58 m en el ancho de copa.

Aunque las tres variables independientes del modelo de la línea A no fueron estadísticamente significativas de manera individual (Cuadro 2), este resultado debe analizarse dentro del contexto metodológico de las guías de densidad. La línea A actúa como un límite empírico superior de densidad máxima y no como un modelo destinado a evaluar efectos causales entre predictores (Pretzsch, 2009; Reineke, 1933). Dado que variables como la densidad del rodal, el DCM y el área basal están matemática y biológicamente interrelacionadas a lo largo de la trayectoria tamaño-densidad, es de esperar que se produzca multicolinealidad, lo que puede disminuir la significancia estadística de los coeficientes individuales. Por ello, el modelo se evaluó principalmente con base en su desempeño general, plausibilidad biológica y concordancia con la teoría tamaño-densidad, más que en la significancia de los parámetros de manera individual.

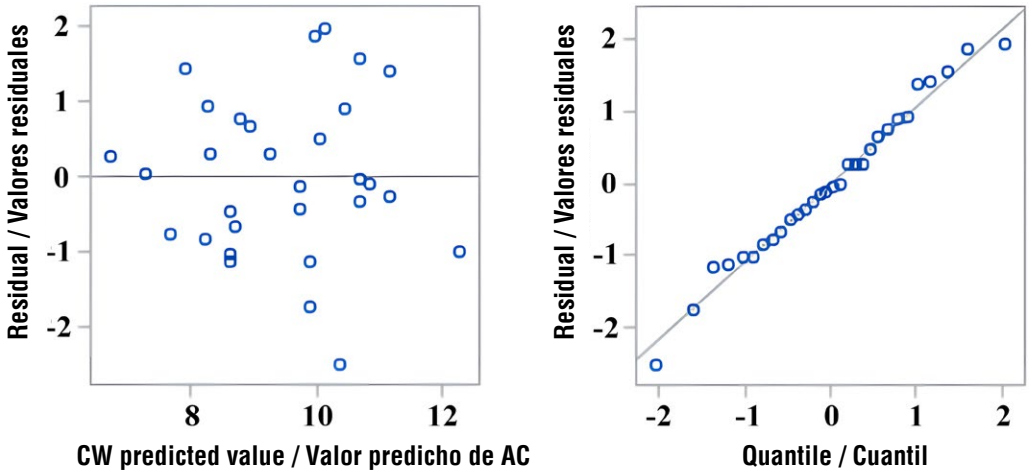

Figure 3. Diagnostic plots for the crown width (CW) model as a function of diameter at breast height (DBH) used to construct the B-line of the stocking guide for *Pinus occidentalis*. Residuals vs. predicted values (left) show no pattern, indicating an adequate model fit. The Q–Q plot (right) closely followed the expected 1:1 line, confirming the normality of the residuals.

Figura 3. Representaciones gráficas del modelo de ancho de copa (AC) en función del diámetro normal utilizado para construir la línea B de la guía de densidad de *Pinus occidentalis*. El gráfico de residuos frente a los valores predichos (izquierda) no mostró patrones evidentes, lo cual indica un ajuste adecuado del modelo. El gráfico Q–Q (derecha) siguió estrechamente la línea 1:1, lo cual confirma la normalidad de los residuos.

B-line of the stocking guide. Residuals were distributed around zero across the range of predicted crown width values indicating no major departures from homoscedasticity or model fit problems. The quantile–quantile (Q–Q) plot demonstrates that residuals closely followed the expected 1:1 line, supporting the assumption of normality. Collectively, these diagnostics confirm that the regression model accurately defines the B-line, which represents the upper limit of effective crown occupancy in stand density regulation.

The relationship shown in Figure 4 indicates that basal area generally increases with stand density. However, this trend is strongly influenced by tree size, as indicated by the point size, which are proportional to QMD^2. At low to moderate densities (below approximately 1 000 trees·ha^{-1}), stands with larger trees (higher QMD^2 values) contribute disproportionately to basal area, reaching values greater than 60 m^2·ha^{-1} despite having relatively few trees.

Conversely, high-density stands with smaller trees have relatively low basal areas, highlighting their limited contribution to total stand biomass. This indicates that although stand density influences the maximum potential basal area, actual stand-level accumulation depends primarily on tree size, as larger trees contribute disproportionately to basal area even at moderate densities. The interaction between stand density and tree size underscores the importance of considering both structural traits when evaluating stand carrying capacity and competitive interactions.

El diagrama de dispersión (Figura 2) mostró relación positiva entre el diámetro del fuste y la expansión de la copa en los árboles utilizados para definir la línea B de la guía. A medida que el DAP aumentó, el ancho de copa también tendió a incrementar, pasando de aproximadamente 7 m en árboles de menor diámetro (~25 cm) a más de 12 m en árboles de mayor tamaño (~50-55 cm). Esta tendencia refleja cómo el tamaño del árbol influye en el desarrollo de la copa bajo condiciones de crecimiento abierto, donde la competencia es reducida y las copas pueden expandirse libremente. Esta relación constituye la base empírica para estimar el área máxima de copa y, en consecuencia, la condición de densidad mínima completa (línea B) en el diagrama de densidad de *P. occidentalis*.

Los resultados respaldan la hipótesis 2 (H2), la cual plantea que la relación entre el tamaño de copa y el diámetro, en árboles que crecen en espacios abiertos, indica un límite inferior de densidad significativo asociado al cierre de copas. La correlación positiva entre el DAP y el ancho de copa muestra la capacidad estructural de *P. occidentalis* para expandirse estructuralmente en condiciones de baja competencia, lo que proporciona una base sólida para estimar la ocupación mínima efectiva del rodal. En consecuencia, la línea B representa una transición estructural entre un espacio de crecimiento subutilizado y una ocupación efectiva del dosel, más que un límite arbitrario para la toma de decisiones de manejo.

La Figura 3 muestra los gráficos de diagnóstico utilizados para evaluar el modelo de regresión que relaciona

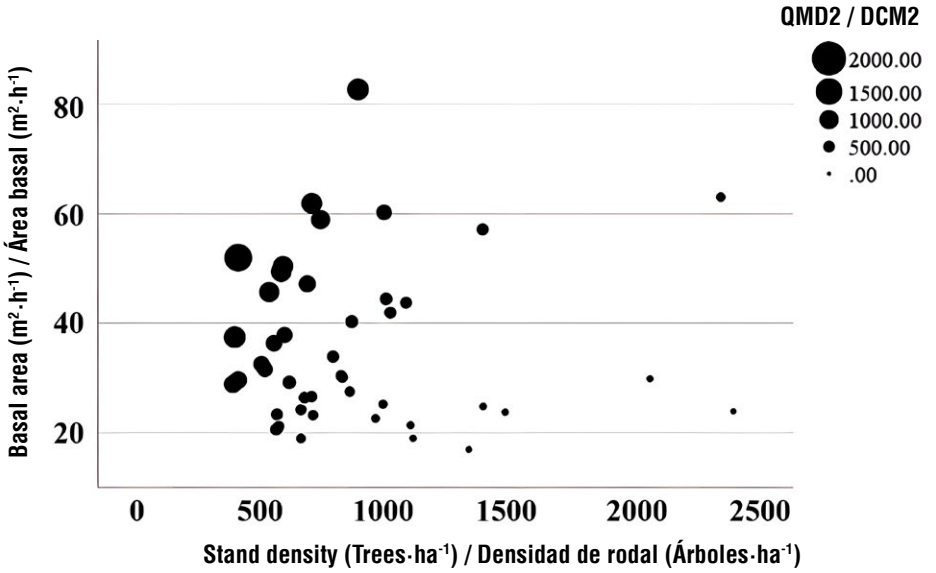

Figure 4. Relationship between basal area and stand density across all sample plots, with point size proportional to quadratic mean diameter (QMD^2), illustrating the dominant effect of tree size on basal area accumulation.

Figura 4. Relación entre el área basal y la densidad de *Pinus occidentalis* en todas las parcelas, donde el tamaño de los puntos es proporcional al diámetro cuadrático medio (DCM^2), lo que ilustra el efecto predominante del tamaño de los árboles sobre la acumulación del área basal.

The A-line and B-line jointly define a critical management zone that guides the regulation of stand development. As QMD increases, the widening separation between the two lines (Table 3) indicates the progressive divergence between the biological capacity of the site and management thresholds as stand age. During early developmental stages, density remains tightly constrained because of the small size of the trees. At larger tree sizes, fewer trees can occupy the same area as a result of crown expansion and increasing competition. This highlights the importance of considering both size–density relationships and crown structure when assessing stand productivity and planning thinning strategies.

The relationship between stand density and tree size directly influences forest productivity, particularly the accumulation of timber volume. At high stand densities, intense competition for light, water, and nutrients limits diameter growth, resulting in numerous small trees with low merchantable volume despite the large number of stems (Looney & Shaw, 2025; Ray et al., 2023). Conversely, lower stand densities allow trees to attain larger dimensions and expand their crowns, thereby increasing volume per tree, although this may reduce total stand production if site resources are not utilized efficiently (Burkhart et al., 2018; Gingrich, 1967). In general, maximum stand productivity is achieved at intermediate densities, where growing space is used efficiently and a balance is attained between individual tree growth and stand

el ancho de copa con el diámetro normal (DAP) para la elaboración de la línea B de la guía. Los residuos se distribuyeron alrededor de cero en función de los valores predichos de ancho de copa, lo que indica la ausencia de desviaciones importantes de homocedasticidad o problemas de ajuste del modelo. El gráfico Q–Q mostró que los residuos siguen de cerca la línea 1:1 esperada, lo que respalda la hipótesis de normalidad. En conjunto, estos diagnósticos confirman que el modelo de regresión define la línea B con precisión, la cual representa el límite superior de ocupación efectiva de las copas en la regulación de la densidad del rodal.

La relación que se muestra en la Figura 4 indica que el área basal suele aumentar con la densidad del rodal; sin embargo, esta tendencia está fuertemente influenciada por el tamaño de los árboles, como lo evidencia el tamaño de los puntos, proporcional al DCM^2. En densidades bajas a moderadas (por debajo de aproximadamente 1 000 N), los rodales con árboles de mayor tamaño (valores elevados de DCM^2) contribuyen de manera desproporcionada al área basal, con valores superiores a 60 $m^2 \cdot ha^{-1}$ a pesar de contar con un número relativamente reducido de árboles.

En contraste, los rodales de densidad elevada con árboles más pequeños presentan áreas basales relativamente bajas, lo que destaca su contribución limitada a la biomasa total del rodal. Esto indica que, aunque la densidad influye en el potencial máximo de área basal, la acumulación real a nivel de rodal depende

Table 3. Predicted values used to construct the A-line and B-line of the *Pinus occidentalis* stocking guide based on quadratic mean diameter (QMD) values ranging from 12 to 48 cm.

Cuadro 3. Valores predichos utilizados para la construcción de las líneas A y B de la guía de densidad de *Pinus occidentalis* a partir de valores de diámetro cuadrático medio (DCM) entre 12 y 48 cm.

A-line / Línea A				B-line / Línea B			
QMD / DCM	TAR / RAA	N	BA / AB	CW / AC	MCA / AMC	N	BA / AB
(cm)	($m^2 \cdot tree^{-1}$) / ($m^2 \cdot árbol^{-1}$)	(trees·ha^{-1}) / (árboles·ha^{-1})	($m^2 \cdot ha^{-1}$)	(m)	(% ha)	(trees·ha^{-1}) / (árboles·ha^{-1})	($m^2 \cdot ha^{-1}$)
12.00	0.55	1 817	20.55	5.00	0.20	509.84	5.77
15.00	0.70	1 429	25.26	5.47	0.24	425.23	7.51
18.00	0.86	1 169	29.76	5.95	0.28	360.06	9.16
20.00	0.96	1 039	32.64	6.26	0.31	324.60	10.20
22.00	1.07	933	35.45	6.58	0.34	294.13	11.18
24.00	1.19	844	38.17	6.90	0.37	267.75	12.11
26.00	1.30	769	40.82	7.21	0.41	244.77	13.00
28.00	1.42	705	43.39	7.53	0.45	224.63	13.83
30.00	1.54	649	45.89	7.85	0.48	206.88	14.62
32.00	1.66	601	48.32	8.16	0.52	191.15	15.37
34.00	1.79	558	50.69	8.48	0.56	177.14	16.08
36.00	1.92	521	52.99	8.79	0.61	164.63	16.76
38.00	2.05	487	55.24	9.11	0.65	153.39	17.40
40.00	2.19	457	57.42	9.43	0.70	143.27	18.00
42.00	2.33	430	59.55	9.74	0.75	134.11	18.58
44.00	2.47	405	61.63	10.06	0.79	125.81	19.13
46.00	2.61	383	63.66	10.38	0.85	118.25	19.65
48.00	2.76	363	65.63	10.69	0.90	111.36	20.15

N: stand density; QMD: quadratic mean diameter; TAR: tree area ratio; BA: basal area; CW: crown width; MCA: maximum crown area.

N: densidad del arbolado; DCM: diámetro cuadrático medio; RAA: relación área-árbol; AB: área basal; AC: ancho de copa; AMC: área máxima de copa.

density (Langsaeter, 1941; Long & Shaw, 2005). The model reflects this fundamental balance by linking stand density and tree size to basal area, which serves as a structural indicator of timber volume and overall stand productivity in even-aged forests.

Table 3 demonstrates how stand density (trees·ha^{-1}) and basal area change with QMD along both the A-line and B-line. At smaller diameters (QMD = 12-18 cm), the A-line represents densely stocked stands with more than 1 100 - 1 800 trees·ha^{-1}, but only moderate basal area (~20-30 $m^2 \cdot ha^{-1}$). As QMD increases, stand density decreases progressively (to about 360 trees·ha^{-1} at 48 cm), while basal area continues to increase, exceeding 65 $m^2 \cdot ha^{-1}$. In contrast, the B-line shows significantly lower stand densities (~110-510 trees·ha^{-1} over the same QMD range) and lower basal area, reflecting the threshold associated with crown closure. Together, these trajectories highlight the increasing divergence between biological carrying capacity (A-line) and management occupancy (B-line) as trees become larger.

principalmente del tamaño de los árboles, ya que los individuos de tamaño superior contribuyen en mayor medida al área basal, incluso en densidades moderadas. La interacción entre densidad y tamaño del árbol subraya la importancia de considerar ambos atributos estructurales en la evaluación de la capacidad del rodal y las interacciones competitivas.

Las líneas A y B definen conjuntamente un margen crítico de manejo que orienta la regulación del desarrollo del rodal. A medida que el DCM aumenta, la separación creciente entre ambas líneas (Cuadro 3) indica la divergencia progresiva entre la capacidad biológica del sitio, y los límites de manejo aumentan con el envejecimiento del rodal. En etapas iniciales, la densidad se mantiene estrictamente restringida debido al tamaño reducido de los árboles; en cambio, a mayores dimensiones, un número menor de árboles puede ocupar la misma superficie como consecuencia de la expansión de las copas y el aumento de la competencia. Esto resalta la importancia de considerar tanto las relaciones tamaño-densidad como la estructura de la

The final stocking chart (Figure 5) integrates these predictions: the A-line represents biological carrying capacity, the B-line represents the management threshold, and relative density iso-lines (40–90 %) allow classification of stands to be classified as understocked, fully stocked, or overstocked.

The developed stocking guide (Figure 5) facilitates the assessment of stand density and the planning of thinning strategies for *P. occidentalis* stands in the study region. Tree density (N) ranges approximately from 50 to 2 050 trees·ha^{-1}, while stand basal area varies from 0 to 70 m^2·ha^{-1}. The iso-lines represent QMD (cm), linking N and basal area combinations that lead to the same average tree size. The diagonal lines labeled 40 % to 90 % show relative density or the percentage of stand occupancy relative to maximum stand density (A-line).

The upper boundary (A-line) indicates the maximum number of trees that a stand can support before density-related mortality occurs. For instance, a *P. occidentalis* stand with 550 trees·ha^{-1} and a basal area of 60 m^2·ha^{-1} approaches this limit. The B-line defines a management threshold often linked to crown closure or the minimum efficient level of site occupancy. The copa en la evaluación de la productividad del rodal y la planificación de estrategias de aclareo.

La relación entre la densidad y el tamaño de los árboles influye directamente en la productividad forestal, particularmente en la acumulación de volumen maderable. En rodales con densidad elevada, la intensa competencia por luz, agua y nutrientes limitan el crecimiento diamétrico, dando lugar a numerosos árboles pequeños con bajo volumen comercial, a pesar del gran número de fustes (Looney & Shaw, 2025; Ray et al., 2023). Por el contrario, densidades más bajas permiten que los árboles alcancen dimensiones mayores y expandan sus copas, lo que aumenta el volumen por árbol, aunque esto puede reducir la producción total del rodal si el sitio no es aprovechado de manera eficiente (Burkhart et al., 2018; Gingrich, 1967). Por lo general, la máxima productividad del rodal se alcanza con densidades intermedias, donde el espacio de crecimiento se utiliza de manera eficiente y se logra un equilibrio entre el crecimiento individual y la densidad de árboles (Langsaeter, 1941; Long & Shaw, 2005). El modelo refleja este equilibrio fundamental al relacionar la densidad y el tamaño de los árboles con el área basal, la cual funciona como un

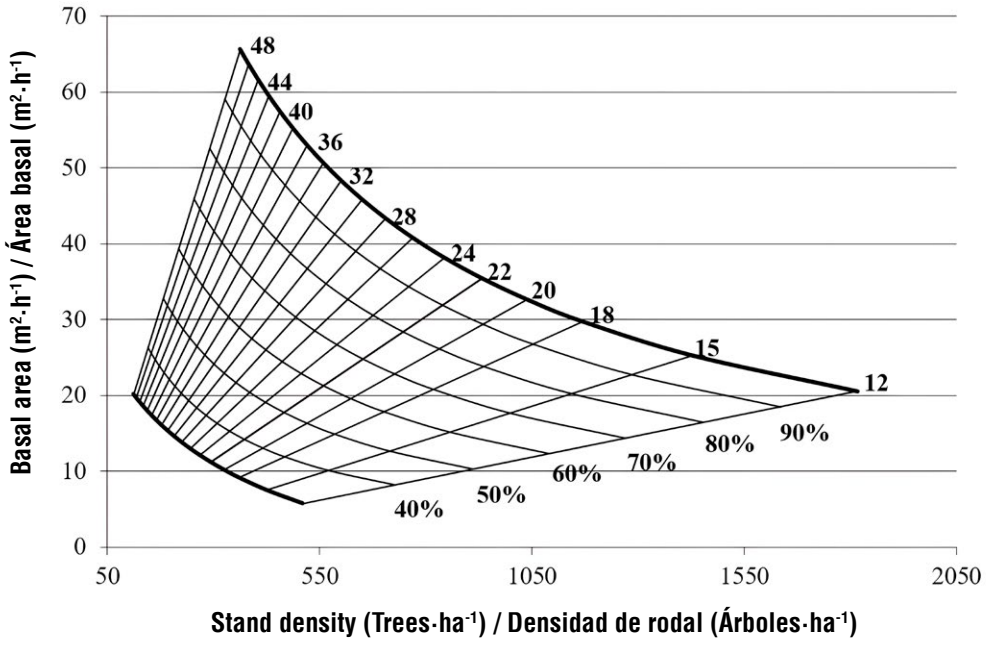

Figure 5. Stocking chart for *Pinus occidentalis* in La Sierra, Dominican Republic showing the maximum size–density boundary (A-line) and the management threshold (B-line), based on the tree area ratio and crown–diameter allometry approaches, respectively. Tree density is shown on the x-axis, and basal area on the y-axis. These lines help evaluate stand occupancy and guide silviculture practices.

Figura 5. Diagrama de densidad de *Pinus occidentalis* en La Sierra, República Dominicana, que muestra el límite máximo de la relación tamaño-densidad (línea A) y el umbral de manejo (línea B), basados en la relación área-árbol y en la alometría copa-diámetro, respectivamente. Las líneas superpuestas representan el diámetro cuadrático medio (cm) y la densidad relativa (% de la ocupación máxima del rodal). Estas líneas permiten evaluar el nivel de ocupación del rodal y orientar las prácticas silvícolas.

diagonal lines (40–90 %) show occupancy levels relative to maximum stand density. Stands near the 40–50 % lines may be considered understocked, meaning that site resources are not being fully utilized. Those between 60-80 % are usually fully stocked and use the site efficiently, allowing continued growth without excessive competition. Stands approaching the 90 % line are nearing their biological carrying capacity, indicating the need for thinning to reduce competition. The QMD lines help estimate average tree size at different N and basal area levels, connecting stand structure with density dynamics.

The development of a stocking guide for *P. occidentalis* in La Sierra provides the first quantitative framework for assessing stand occupancy and management thresholds in the pine forests of the Dominican Republic. The guide establishes two key references: the A-line, representing maximum stand density, and the B-line, defining the management threshold based on crown allometry. This dual approach follows the traditional Gingrich stocking charts and density management guides developed in North America, Asia, and Europe (Jang et al., 2021; Kara & Topaçoglu, 2018; Kondoh, 2023; Yang & Brandeis, 2022), and is comparable to the long-standing use of stocking guides in diverse pine forests throughout Mexico (Acevedo-Benítez et al., 2018; Cabrera-Pérez et al., 2019; Romero-Sanchez et al., 2018; Vargas-Larreta et al., 2024).

The A-line of *P. occidentalis* traces a self-thinning trajectory from 1817 trees·ha^{-1} at 12 cm QMD to 363 trees·ha^{-1} at 48 cm. At 32 cm QMD, predicted values reached 601 trees·ha^{-1} and 48.32 m^2·ha^{-1} (Table 3), aligning with values for *Pinus densiflora* Siebold & Zucc. and *Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière in Korea (Lee & Choi, 2020). The basal area increased from 20.6 to 65.6 m^2·ha^{-1} across size classes, underscoring high biological carrying capacity, comparable to *Pinus palustris* Mill. (Kara et al., 2017), *Pinus sylvestris* L. (Kara, 2018), and *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson (Jang et al., 2021). Values observed in the Dominican Republic frequently exceed those reported for temperate regions, likely owing to the species-specific growth dynamics of *P. occidentalis* and the favorable climatic conditions of high-elevation Caribbean environments.

The B-line provides a biologically based threshold that ensures sufficient growing space, and is consistent with canopy closure concepts (Kondoh, 2023). Species-specific crown allometry is critical: for example, *Pinus brutia* Ten. shows earlier closure due to greater lateral crown expansion under open-grown conditions (Kara & Topaçoglu, 2018). In *P. occidentalis*, the separation between the A-line and B-line delineates understocked and fully stocked stand conditions. Relative density iso-lines (40-90 %) facilitate decision-making, similar

indicador estructural del volumen maderable y de la productividad total del rodal en bosques coetáneos.

El Cuadro 3 muestra cómo la densidad del rodal (árboles·ha^{-1}) y el área basal varían con el DCM tanto en la línea A como en la línea B. En diámetros pequeños (DCM = 12-18 cm), la línea A presenta rodales densos con más de 1100 - 1800 árboles·ha^{-1}, pero con áreas basales moderadas (~20-30 m^2·ha^{-1}). A medida que el DCM aumenta, la densidad disminuye progresivamente (hasta aproximadamente 360 árboles·ha^{-1} a 48 cm), mientras que el área basal continúa incrementando y supera los 65 m^2·ha^{-1}. Por el contrario, la línea B presenta densidades significativamente más bajas (~110-510 árboles·ha^{-1} para el mismo intervalo de DCM) y áreas basales menores, lo que refleja el umbral asociado con el cierre de copas. En conjunto, estas trayectorias resaltan la creciente diferencia entre la capacidad de carga biológica (línea A) y la ocupación de manejo (línea B) conforme aumenta el tamaño de los árboles.

El diagrama de densidad final (Figura 5) integra estas predicciones: la línea A representa la capacidad de carga biológica, la línea B representa el umbral de manejo y las isolíneas de densidad relativa (40–90 %) permiten la clasificación de los rodales en condiciones de ocupación baja, ocupación completa o sobrepoblación.

La guía de densidad desarrollada (Figura 5) facilita la evaluación de la densidad del rodal y la planificación de las estrategias de aclareo en rodales de *P. occidentalis* en la región de estudio. La densidad arbórea (N) varía aproximadamente entre 50 y 2050 árboles·ha^{-1}, mientras que el área basal del rodal oscila entre 0 y 70 m^2·ha^{-1}. Las isolíneas representan el DCM (cm), uniendo combinaciones de N y área basal que producen el mismo tamaño promedio de árbol. Las líneas diagonales etiquetadas con 40 % a 90 % representan la densidad relativa o porcentaje de ocupación del rodal con respecto a la densidad máxima del rodal (línea A).

El límite superior de densidad (línea A) indica el número máximo de árboles que una especie puede sostener antes de que ocurra mortalidad. Por ejemplo, un rodal de *P. occidentalis* con 550 árboles·ha^{-1} y área basal de 60 m^2·ha^{-1} se aproxima a este límite. La línea B define un umbral de manejo, comúnmente asociado con el cierre de copas o al nivel mínimo eficiente de ocupación del sitio. Las líneas diagonales (40–90 %) indican los niveles de ocupación en relación con la densidad máxima. Los rodales cercanos a las líneas del 40–50 % pueden considerarse subdensos, lo que indica que los recursos del sitio no se están aprovechando plenamente. Aquellos entre 60-80 % suelen estar completamente ocupados y utilizan el sitio de manera eficiente, permitiendo el crecimiento sin competencia excesiva. Los rodales próximos a la línea

to *P. sylvestris,* where BA along the B-line ranges from 11to 29 $m^2 \cdot ha^{-1}$ (Kara, 2018). At a QMD of 32 cm, the Dominican B-line predicts 191 trees·ha^{-1}, a lower value than that reported for Korean species (Lee & Choi, 2020), again highlighting the distinctive crown structure of *P. occidentalis*.

Site-specific variation in maximum size-density relationship and management thresholds has been widely documented. For *Pinus rudis* Endl. in Mexico, A-lines were derived using Reineke's model (Martínez-Santiago et al., 2021), while *P. sylvestris* canopy closure thresholds vary according to site quality (Kara, 2018). The stocking guide developed for *P. occidentalis* fills a regional knowledge gap, an recommends thinning at relative densities between 40 and 70 % of maximum stand occupancy. Flexibility in defining the management zone is essential, as its boundaries may vary depending on management objectives and treatment intensity (Ray et al., 2023).

Values below the B-line indicate a need to promote regeneration, while proximity to the A-line suggests that thinning may be necessary to reduce mortality risk. This reflects best management practice, in which stocking guides seek to balance production, resilience, and ecosystem services (Jang et al., 2021). Although robust A- and B-lines have been established (Table 3; Figure 3), further refinements based on growth and yield data, long-term thinning trials, and site modifiers could further improve predictive accuracy, consistent with recent advances in stand density modeling (Jang et al., 2021; Kara & Topaçoglu, 2018; Kondoh, 2023).

Conclusions

This study developed a species-specific stocking guide for *Pinus occidentalis* in La Sierra, Dominican Republic, by integrating a maximum size–density boundary derived from a tree area ratio model with a management threshold based on crown–diameter allometry. The results supported Hypothesis 1, showing that maximum stand density follows a predictable size–density trajectory represented by stand structural variables, with the tree area ratio model explaining about 90 % of the variation in the upper density boundary. Hypothesis 2 was also supported, as crown width increased significantly with stem diameter, offering a biological basis for establishing minimum fully stocked conditions. The crown–diameter relationship helped estimate the B-line, indicating the shift from underutilized growing space to effective canopy interaction. Together, the A- and B-line define a practical density management zone. Keeping stands at 40–70 % of maximum density promotes balanced growth and efficient site use while reducing risk of density-related mortality. This framework offers a

del 90 % se acercan a su capacidad biológica máxima, lo que sugiere la necesidad de realizar aclareos para reducir la competencial. Las líneas de DCM permiten la estimación del tamaño promedio de los árboles en diferentes niveles de N y área basal, relacionando la estructura del rodal con la dinámica de la densidad.

La elaboración de la guía de densidad para *P. occidentalis* en La Sierra ofrece el primer marco cuantitativo para evaluar la ocupación del rodal y los umbrales de manejo en los bosques de pino de la República Dominicana. La guía establece dos referencias fundamentales: la línea A, que representa la densidad máxima del rodal y la línea B que define el umbral de manejo a partir de la alometría de copa. Este enfoque dual sigue la tradición de los diagramas de Gingrich y de las guías de manejo de densidad desarrolladas en América del Norte, Asia y Europa (Jang et al., 2021; Kara & Topaçoglu, 2018; Kondoh, 2023; Yang & Brandeis, 2022) y es comparable con el uso histórico de guías de densidad en diversos boques de pino en México (Acevedo-Benítez et al., 2018; Cabrera-Pérez et al., 2019; Romero-Sanchez et al., 2018; Vargas-Larreta et al., 2024).

La línea A de *P. occidentalis* sigue una trayectoria de autoaclareo, pasando de 1817 árboles·ha^{-1} a 12 cm de DCM hasta 363 árboles·ha^{-1} a 48 cm. Para un DCM de 32 cm, las predicciones alcanzaron 601 árboles·ha^{-1} y 48.32 $m^2 \cdot ha^{-1}$ (Cuadro 3), lo que concuerda con los valores registrados para *Pinus densiflora* Siebold & Zucc. y *Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière en Corea (Lee & Choi, 2020). El área basal aumentó de 20.6 a 65.6 $m^2 \cdot ha^{-1}$ a lo largo de las categorías de tamaño, lo que resalta gran capacidad de carga, comparable con la observada en *Pinus palustris* Mill. (Kara et al., 2017), *Pinus sylvestris* L. (Kara, 2018) y *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson (Jang et al., 2021). Los valores registrados en República Dominicana frecuentemente superan los reportados para zonas templadas, probablemente debido a la dinámica propia de crecimiento propia de la especie y a las condiciones climáticas favorables de los ambientes caribeños con elevación alta.

La línea B proporciona un umbral sustentado en criterios biológicos que garantiza un espacio de crecimiento suficiente, en concordancia con los conceptos de cierre de copas (Kondoh, 2023). En este contexto, la alometría de copa específica de cada especie desempeña un papel fundamental; por ejemplo, *Pinus brutia* Ten. presenta un cierre de copas más temprano, debido al mayor desarrollo lateral de las copas en condiciones de crecimiento abierto (Kara & Topaçoglu, 2018). En *P. occidentalis*, la separación entre las líneas A y B delimita las condiciones de subocupación y ocupación completa del rodal. Las isolíneas de densidad relativa (40-90 %) facilitan la toma de decisiones, de manera similar a lo reportado para *P.*

quantitative basis for adaptive stand density regulation in Dominican pine forests.

Acknowledgments

This research was funded by the Ministry of Higher Education, Science and Technology of the Dominican Republic through the National Fund for Innovation and Scientific and Technological Development (FONDOCyT), Grant No. 2018-2019-2B4-088. The Article Processing Charge (APC) was funded by the Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (Nº 121-2019-PUCMM). The authors acknowledge the efforts and contributions of the Purchasing Department and the administrative staff of the Vice-Rectorate for Research and Innovation at the Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra, as well José Reyes, Cristian Goris and Roque Herrera for their support during fieldwork. The authors further extended their sincere appreciation to Luis Eduardo Peralta for his continuous support throughout the project and to Pablo Ovalles for his valuable collaboration.

Conflicts of Interest

The authors declare that we have no known financial conflicts of interest or personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

Declaration of the use of AI

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technologies were used in the conceptualization, analysis, or interpretation of this research. AI-based tools were used solely for minor language editing and grammar correction.

End of English version

References / Referencias

Acevedo-Benítez, F. C., González-Tagle, M. A., Himmelsbach, W., Aguirre-Calderón, Ó. A., & Jiménez-Pérez, J. (2018). Diagrama de manejo de densidad para el género *Pinus* en el ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9*(50). https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.262

Baral, S. K. (2017). *Stocking guide: A tool for managing young even-aged hardwood stands. Silviculture Technical Note.* https://hardwoodsnb.ca/wp-content/uploads/2023/05/26-2017_2_08-Stocking-Guide.pdf

Bueno-López, S. W., Caraballo-Rojas, L. R., & Torres-Herrera, J. G. (2024). Evaluation of different modeling approaches for estimating total bole volume of Hispaniolan pine (*Pinus occidentalis* Swartz) in different ecological zones. *Forests, 15,* 1052. https://doi.org/10.3390/f15061052

Burkhart, H. E., Avery, T. E., & Bullock, B. P. (2018). *Forest measurements* (6th ed.). Waveland Press, Long Grove, IL.

sylvestris, donde el área basal correspondiente a la línea B varía entre 11 y 29 $m^2 \cdot ha^{-1}$ (Kara, 2018). Para un DCM de 32 cm, la línea B dominicana estimó 191 árboles·ha^{-1}, valor inferior al registrado en especies coreanas (Lee & Choi, 2020), lo que nuevamente resalta la estructura particular de copa.

La variación específica del sitio en la relación densidad-tamaño máxima y en los umbrales de manejo ha sido documentada ampliamente. En *Pinus rudis* Endl. de México, las líneas A se basaron en el modelo de Reineke (Martínez-Santiago et al., 2021), mientras que en *P. sylvestris,* los umbrales de cierre de copas varían según la calidad del sitio (Kara, 2018). En este sentido, la guía de densidad de *P. occidentalis* cubre un vacío de conocimiento regional y recomienda una densidad de aclareo entre 40-70 % con respecto a la densidad original. La flexibilidad a la hora de definir la zona de manejo es esencial, ya que puede variar en función de los objetivos y la intensidad (Ray et al., 2023).

Los valores por debajo de la línea B indican la necesidad de promover la regeneración, mientras que la proximidad a la línea A sugiere la necesidad de aclareos para reducir la mortalidad. Esto refleja las mejores prácticas de manejo, donde los diagramas de densidad buscan el equilibrio entre la producción, la resiliencia y los servicios ecosistémicos (Jang et al., 2021). Aunque en este estudio ya se han establecido líneas A y B sólidas (Cuadro 3; Figura 3), futuros refinamientos basados en datos de crecimiento y rendimiento, ensayos de aclareo a largo plazo y modificadores de calidad de sitio permitirán mejorar la precisión predictiva, con base en los avances recientes en modelación de densidad (Jang et al., 2021; Kara & Topaçoglu, 2018; Kondoh, 2023).

Conclusiones

En este estudio se desarrolló una guía de densidad específica para *Pinus occidentalis* en La Sierra, República Dominicana, mediante la integración de un límite máximo de la relación densidad-tamaño, derivado de un modelo de la relación área-árbol, y de un umbral de manejo basado en la alometría copa-diámetro. Los resultados respaldaron la hipótesis 1, que señala la densidad máxima del rodal sigue una trayectoria densidad-tamaño predecible representada por variables estructurales, donde el modelo de relación área-árbol explicó cerca del 90 % de la variación en el límite superior. La hipótesis 2 también se confirmó, ya que el ancho de copa mostró incremento significativo con el diámetro del fuste, y proporcionó una base biológica para el establecimiento de las condiciones mínimas de cobertura total. La relación copa-diámetro permitió la estimación de la línea B, lo que indica el cambio entre un espacio de crecimiento subutilizado a una interacción efectiva de copas. Las líneas A y B delimitan

Cabrera-Pérez, R. S., Corral-Rivas, S., Quiñonez-Barraza, G., Nájera-Luna, J. A., Cruz-Cobos, F., & Calderón-Leal, V. H. (2019). Density management diagram for mixed-species forests in the El Salto region, Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 25*(1), 17-29. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.03.026

Carson, M. T., Zobel, J.M., Bronson, D. R., McGraw, A. M., Woodall, C. W., & Kern, C. C. (2023). The case for stand management guidelines as dynamic as global change: Aspen forest stockings of the western Great Lakes. *Forest Ecology and Management, 536,* 120905. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120905.

Gingrich, S. F. (1967). Measuring and evaluating stocking and stand density in upland hardwood forests in the Central States. *Forest Science, 13*(1), 38–53. https://doi.org/10.1093/forestscience/13.1.38

Halligan, K. J., & Nyland, R. D. (1999). Relative density guides for Norway spruce plantations in New York. *Northern Journal of Applied Forestry, 16*(1), 33–39. https://doi.org/10.1093/njaf/16.1.33

Hernández-Martínez, A. J., Reyes-Hernández, V. J., Santos-Posadas, H. M., Velázquez-Martínez, A., & Quiñonez-Barraza, G. (2024). Use of density management diagrams for mixed stands in the state of Michoacan. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *15*(82), 89-115. https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i82.1450

IBM Corp. (2020). *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 27.0*. IBM Corporation.

Jang, W. S., Ritchie, M. W., & Zhang, J. (2021). Improved equations for the density management diagram isolines of ponderosa pine stands. *Forest Science, 67*(1), 93–102. https://doi.org/10.1093/forsci/fxaa022

Kara, F., Loewenstein, E. F., Lhotka, J. M., & Kush, J. S. (2017). A Gingrich-style stocking chart for longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) forests. *Forest Science, 64*(3), 307–315. https://doi.org/10.5849/FS-2016-066

Kara, F., & Topaçoglu, O. (2018). Onset of canopy closure for black pine, Turkish red pine and Scots pine forests. *Journal of Forest Science, 64,* 224–229. https://doi.org/10.17221/5/2018-JFS

Kara, F. (2018). A Stocking diagram for silvicultural implications in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 18*(1), 53-61. https://doi.org/10.17475/kastorman.322565

Kondoh, H. (2023). Assessment of the full density curve in stand density management diagrams for Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) in Kyushu Island, Japan: Implications for forest management. *Forests, 14*(11), 2129. https://doi.org/10.3390/f14112129

Krajicek, J. E., Brinkman, K. A., & Gingrich, S. F. (1961). *Crown competition—a measure of density.* U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Central States Forest Experiment Station. Technical Paper No. 41. https://doi.org/10.2737/CS-TP-41

Langsaeter, A. (1941). Om tynning i enaldret gran- og furuskog. *Meddelelser fra Det Norske Skogforsøksvesen, 8,* 131–216.

Lee, D., & Choi, J. (2020). Stocking diagrams for silvicultural guideline in Korean pines and Japanese larch. *Forests, 11*(8), 833. https://doi.org/10.3390/f11080833

Long, J. N., & Shaw, J. D. (2005). A density management diagram for even-aged ponderosa pine stands. *Western Journal of Applied Forestry, 20,* 205–215. https://doi.org/10.1093/wjaf/20.4.205

un margen práctico para el manejo de densidad. El mantenimiento de los rodales con densidad máxima entre 40–70 % favorece el crecimiento equilibrado y uso eficiente del sitio, al tiempo que reduce el riesgo de mortalidad relacionada con la densidad. Este marco proporciona una base cuantitativa para la regulación adaptativa de la densidad en estos bosques de pino.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología de la República Dominicana, Fondo Nacional para la Innovación y el Desarrollo Científico y Tecnológico, subvención número FONDOCyT 2018-2019-2B4-088. El APC fue financiado por la Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (núm. 121-2019-PUCMM). Reconocemos el arduo trabajo y las contribuciones del departamento de adquisiciones y del personal administrativo en la Vice-Rectoría de Investigación e Innovación de la PUCMM, junto con el personal de campo José Reyes, Cristian Goris y Roque Herrera. Nuestro agradecimiento especial es para Luis Eduardo Peralta por su apoyo continuo durante el proceso y para Pablo Ovalles por su valiosa colaboración.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaración del uso de inteligencia artificial (IA)

Los autores declaramos no haber utilizado IA generativa o tecnologías asistidas por IA para el desarrollo del presente manuscrito.

Fin de la versión en español

Looney, C. E., & Shaw, J. D. (2025). Climate and nitrogen deposition constrain the maximum size-density boundary for mature and old-growth stands. *Frontiers in Forests and Global Change, 8,* 1566459. https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1566459

Martínez-Santiago, D., Caballero-Cruz, P., Hernández, E. F., Garzón-Trinidad, A., Ortiz-Barrios, R., Cruz-Santiago, O. L., Aparicio-Cuevas, I., & Sandoval-García, C. (2021). Density management guide for natural stands of *Pinus rudis* Endl. in Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *12*(64). https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.822

Pretzsch, H. (2009). *Forest dynamics, growth and yield: From measurement to model*. Berlin–Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4

Ray, D., Seymour, R., Fraver, S., Berrill, J. P., Kenefic, L., Rogers, N., & Weiskittel, A. (2023). Relative density as a standardizing metric for the development of size-density management

charts. *Journal of Forestry, 121*(5–6), 443–456. https://doi.org/10.1093/jofore/fvad029

Reineke, L. H. (1933). Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research, 46*(7), 627–638. https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968395/PDF

Romero-Sanchez, M. E., Perez-Miranda, R., Gonzalez-Hernandez, A., Velasco-Garcia, M. V., Velasco-Bautista, E., & Flores, A. (2018). Current and potential spatial distribution of six endangered pine species of Mexico: Towards a conservation strategy. *Forests*, *9*(12), 767. https://doi.org/10.3390/f9120767

Vargas-Larreta, B., Flores-Salas, R., Tuero-Campagne, O. J., Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, C. G., & Cruz-Cobos, F. (2024). Diagramas de manejo de densidad para *Pinus cooperi* var. *ornelasi* (Martínez) Blanco en Durango, México. *Colombia Forestal, 27*(1), e20878. https://doi.org/10.14483/2256201X.20878

Yang, S. I., & Brandeis, T. J. (2022). Estimating maximum stand density for mixed-hardwood forests among various physiographic zones in the eastern US. *Forest Ecology and Management, 521,* 120420. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120420