

Stem analysis-based procedure to estimate a posteriori whether the long-term timber yield of a forest has been sustained

Procedimiento basado en análisis troncales para estimar *a posteriori* si el rendimiento maderable de un bosque ha sido sostenido a largo plazo

Francisco J. Zamudio-Sánchez^{1*}; Arturo A. Alvarado-Segura² ;
Karen I. De la Cruz-De la Cruz¹; Maricruz Aguilar-Ávila¹

¹Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, Departamento de Estadística, Matemática y Cómputo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

²Tecnológico Nacional México, ITS del Sur del Estado de Yucatán. Carretera Muna-Felipe Carrillo Puerto, tramo Oxkutzcab-Akil, km 41+400. C. P. 97880. Oxkutzcab, Yucatán, México.

*Corresponding author: fzamudios@chapingo.mx; tel.: +52 595 109 0486.

Abstract

Introduction: Sustained timber yield is the ability of the forest to maintain its production at a similar level through time.

Objective: To propose a procedure to estimate a posteriori whether the long-term timber yield of a forest has been sustained by assessing the heights and diameters reached by same-aged trees but established in different years.

Materials and methods: Diameters were gotten from stem analysis and heights were estimated by linear interpolation. Trees were grouped by size, and heights and diameters of same-aged trees established in different years were regressed versus the Year at which Trees Reached that Age (YTRA). All the trees were analyzed by multiple regression, regardless of the size groups; the regression model included the reciprocal of the tree age and the YTRA as explanatory variables for height and diameter.

Results: Regression of heights and diameters versus YTRA at different ages (10, 20,..., 70) showed positive slopes, indicating that the more recently established trees had better growth and no evidence of deterioration of timber yield over time was found. The results on all the trees as a whole agreed with results for trees by size groups; these results coincided with what forest managers observed *in situ*.

Conclusion: The procedure provides user-friendly tools to detect any negative changes that may jeopardize timber yield sustainability, identify possible causes, and implement corrective management practices.

Keywords: sustained yield; timber production; sustainable forest management; *Pinus patula*; *a posteriori* measurement.

Resumen

Introducción: El rendimiento maderable sostenido es la capacidad del bosque para mantener su producción a un nivel similar a través del tiempo.

Objetivo: Proponer un procedimiento para estimar, *a posteriori*, si el rendimiento maderable de un bosque ha sido sostenido a largo plazo, mediante la evaluación de las alturas y diámetros alcanzados por árboles de la misma edad, pero establecidos en años diferentes.

Materiales y métodos: Los diámetros se obtuvieron de análisis troncales y las alturas se estimaron por interpolación lineal. Los árboles se agruparon por tamaño y se realizaron regresiones de las alturas y los diámetros de árboles de la misma edad establecidos en años diferentes contra el año en que alcanzaron esa edad (YTRA, por sus siglas en inglés). Todos los árboles se analizaron mediante regresión múltiple sin considerar los grupos de tamaño; el modelo incluyó el recíproco de la edad del árbol y el YTRA como variables explicativas de la altura y el diámetro.

Resultados: La regresión de alturas y diámetros contra YTRA a edades diferentes (10, 20,..., 70) mostró pendientes positivas, lo que indica que los árboles establecidos recientemente tuvieron mejor crecimiento y que el rendimiento maderable ha sido sostenido a lo largo del tiempo. Los resultados con respecto a todos los árboles en su conjunto coincidieron con los de los árboles por grupos de tamaño y concuerdan con lo que los administradores forestales observaron *in situ*.

Conclusión: El procedimiento proporciona herramientas de uso fácil para la detección de cualquier cambio negativo que pueda poner en peligro la sostenibilidad del rendimiento maderable y para identificar posibles causas e implementar prácticas de manejo correctivas.

Palabras clave: rendimiento sostenido; producción maderable; manejo forestal sostenible; *Pinus patula*; medición *a posteriori*.

Please cite this article as follows (APA 7): Zamudio-Sánchez, F. J., Alvarado-Segura, A. A., De la Cruz-De la Cruz, K. I., & Aguilar-Ávila, M. (2023). Stem analysis-based procedure to estimate a posteriori whether the long-term timber yield of a forest has been sustained. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(2), 3-24. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2021.10.062>

Received: October 16, 2021 / Accepted: March 7, 2023



<https://revistas.chapingo.mx/forestales>

Introduction

Forest ecosystems give goods and environmental services for human well-being like sources of food, medicines and biofuel, raw materials for construction, clean air and water, protection of soil and water, and vital wood supplies; they also help to mitigate climate change (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2020; Tidwell, 2016). Thus, these resources must be preserved; for this, one has to properly manage forest stocks to meet the broad-sense goal for satisfying social, economic, cultural and spiritual needs (FAO, 2015).

Over a number of meetings, researchers have established a set of criteria and indicators for determining the progress towards sustainable forest management at regional and national scales (Baycheva-Merger & Wolfslehner, 2016; Jalilova et al., 2012; Larrubia et al., 2017). These criteria and indicators cover seven thematic elements of sustainable forest management: extent of forest resources; biological diversity; forest health and vitality; three types of functions (protective, productive, and socio-economic), and legal policy and institutional frameworks (Jalilova et al., 2012; Larrubia et al., 2017). However, to complement the criteria and indicators information at the local scale, there is a need for objective, practical, and relatively cheap measures, as the one of sustained timber yield, which managers can adopt. Although it is true that an index or measure that estimates the recovery of stocks is affordable, one must always be vigilant of other changes in the forest since, as a multidimensional system, the measure cannot always fully capture them (Picard et al., 2012).

The sustained yield has been an accepted principle and a paradigm in forestry for a long time (Hahn & Knoke, 2010). Sustained yield is the ability of the forest to maintain its growth or production, in terms of volume and biomass, approximately at the same level or higher than its historical average (Dauber et al., 2005; Irland, 2010). The concept has evolved, but the original meaning is still pertinent and indirectly represents many relevant ecological processes that occur in the forest (Irland, 2010). Monitoring and assessing timber yield is important because they allow verifying that soil productivity, the amount of water, and other abiotic elements and living beings remain in good condition (Irland, 2010). Consequently, if there are indications that timber yield has not been sustained, this should lead to the implementation of appropriate management operations to mitigate forest degradation.

The recovery rates of volume stocks of trees have been used, after the felling period, to evaluate whether the timber yield has been sustained (Castro et al., 2021; Pioniot et al., 2018; Vidal et al., 2016). These evaluations require the availability of timber volume data during

Introducción

Los ecosistemas forestales proporcionan bienes y servicios ambientales para el bienestar humano, ya sea como fuentes de alimentos, medicinas y biocombustibles, materias primas para la construcción, aire y agua limpios, protección del suelo y agua, y suministros vitales de madera; también ayudan a mitigar el cambio climático (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020; Tidwell, 2016). Por tanto, estos recursos deben preservarse; para ello, hay que gestionar adecuadamente las reservas forestales y así cumplir el objetivo global de satisfacer las necesidades sociales, económicas, culturales y espirituales (Larrubia et al., 2017).

A lo largo de varias reuniones, los investigadores han establecido un conjunto de criterios e indicadores para determinar el progreso hacia la gestión forestal sostenible a escala regional y nacional (Baycheva-Merger & Wolfslehner, 2016; Jalilova et al., 2012; Larrubia et al., 2017). Estos criterios e indicadores abarcan siete elementos temáticos de la gestión forestal sostenible: extensión de recursos forestales, diversidad biológica, salud y vitalidad de los bosques, tres tipos de funciones (protectora, productiva y socioeconómica), y política legal y marcos institucionales (Jalilova et al., 2012; Larrubia et al., 2017). No obstante, para complementar la información sobre criterios e indicadores a escala local, se necesitan medidas objetivas, prácticas y relativamente económicas, como la del rendimiento maderable sostenido, que los gestores puedan adoptar. Si bien es cierto que un índice o medida que estime la recuperación de las existencias es alcanzable, siempre hay que estar atentos a otros cambios en el bosque ya que, al tratarse de un sistema multidimensional, la medida no siempre puede reflejarlos plenamente (Picard et al., 2012).

El rendimiento sostenido es un principio aceptado y un paradigma forestal desde hace mucho tiempo (Hahn & Knoke, 2010). El rendimiento sostenido es la capacidad del bosque para mantener su crecimiento o producción, tanto en volumen como en biomasa, aproximadamente al mismo nivel o por encima de su media histórica (Dauber et al., 2005; Irland, 2010). El concepto ha evolucionado, pero el significado original sigue siendo pertinente y representa indirectamente muchos procesos ecológicos relevantes que tienen lugar en el bosque (Irland, 2010). El monitoreo y la evaluación del rendimiento maderable son importantes porque permiten verificar que la productividad del suelo, la cantidad de agua y otros elementos abióticos y seres vivos se mantienen en buenas condiciones (Irland, 2010). En consecuencia, si existen indicios de que el rendimiento maderable no se ha mantenido, esto debería conducir a la aplicación de operaciones de gestión adecuadas para mitigar la degradación forestal.

the harvesting period, from the beginning to the end, which generally come from permanent plots or forest inventories. However, it is necessary to have options to estimate whether the timber yield has been sustained when such data of inventory or permanent plots are not available. On the other hand, environmental conditions in forest ecosystems change rapidly and often vary before it is possible to verify the suitability of silvicultural practices (Anderson-Teixeira et al., 2013). One possible solution is to look at the system output to confirm the expected results and to verify if the environment remains in good condition, which is the *ex-post* approach of the procedure presented here.

The objective of this study is to propose a procedure to measure *a posteriori* whether the timber yield of a forest has been sustained over a wide time scale by tracking the heights and diameters reached by same-aged trees established in different years. Timber yield will be sustained if there is a sustainable forest, in the medium and long term.

Materials and methods

Study area

Data was chosen from a forest area with an extension of 18 070 ha in Santiago Comaltepec, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, Mexico, to illustrate the procedure for tracking timber yield. It is a temperate forest with dominant presence of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., mixed with *Pinus oaxacana* Mirov., *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *Quercus* spp. and *Arbutus* spp. The forest is located in the Sierra Norte, between 96° 30' 54.90" and 96° 30' 50.85" W and 17° 34' 13.26" and 17° 34' 6.32" N, at an altitude of 2005 m (Figure 1).

From 1956 to 1982, the study area was under a concession to a papermaking company (Fábricas de Papel Tuxtepec), a time when all the wood of any species of *Pinus* was transformed into cellulose. Between 1956 and 1992, the wood was extracted under the Mexican Method of Forest Regulation (MMFR). The MMFR is based on the selective cutting of senile, plagued, sick, poorly shaped or standing dead trees, with a maximum pre-established cutting intensity of 35 % and a 25-year-cutting cycle; the aim is to convert over-mature forests to better productivity forests (Torres-Rojo et al., 2016). Subsequent to 1992, the Method for Silvicultural Development was adopted, using clearcutting in strips and seed trees as regeneration methods, enriched with planted seedlings (Roldán-Félix, 2014).

Sampling and tree grouping

A sample of 98 adult trees of *P. patula* was taken as representative for evaluating the growth of diameter

Las tasas de recuperación de reservas de volumen de árboles se han utilizado tras el periodo de corta para evaluar si el rendimiento maderable ha sido sostenido (Castro et al., 2021; Pioniot et al., 2018; Vidal et al., 2016). Estas evaluaciones requieren datos de volumen de madera durante el periodo de aprovechamiento, desde el inicio hasta el final, que generalmente proceden de parcelas permanentes o inventarios forestales; sin embargo, es necesario disponer de opciones para estimar si el rendimiento maderable ha sido sostenido cuando no se cuenta con dichos datos de inventario o de parcelas permanentes. Por otro lado, las condiciones ambientales de los ecosistemas forestales cambian rápidamente y suelen variar antes de que sea posible verificar la idoneidad de las prácticas silvícolas (Anderson-Teixeira et al., 2013). Una posible solución es observar la producción del sistema para confirmar los resultados esperados y verificar si el medio ambiente se mantiene en buenas condiciones, que es el enfoque *ex post* del procedimiento que aquí se presenta.

El objetivo de este estudio fue proponer un procedimiento para medir *a posteriori* si el rendimiento maderable de un bosque ha sido sostenido a lo largo de una escala temporal amplia, mediante el seguimiento de las alturas y diámetros alcanzados por árboles de la misma edad, pero establecidos en años diferentes. El rendimiento maderable será sostenido si existe un bosque sostenible a mediano y largo plazo.

Materiales y métodos

Área de estudio

Se eligieron datos de un área forestal con extensión de 18 070 ha en Santiago Comaltepec, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, para ilustrar el procedimiento de seguimiento del rendimiento maderable. Se trata de un bosque templado con presencia dominante de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., mezclado con *Pinus oaxacana* Mirov., *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *Quercus* spp. y *Arbutus* spp. El bosque está situado en la Sierra Norte, entre 96° 30' 54.90" y 96° 30' 50.85" O y 17° 34' 13.26" y 17° 34' 6.32" N, a una elevación de 2005 m (Figura 1).

Durante los años 1956 a 1982, el área de estudio estuvo concesionada a una empresa papelera (Fábricas de Papel Tuxtepec), época en la que toda la madera de cualquier especie de *Pinus* se transformaba en celulosa. Entre 1956 y 1992, la madera se extrajo bajo el Método Mexicano de Regulación Forestal (MMFR). Este se basa en la tala selectiva de árboles seniles, plagados, enfermos, mal formados o muertos en pie, con una intensidad máxima de corta preestablecida de 35 % y un ciclo de corta de 25 años; el objetivo es convertir bosques sobremaduros en bosques de mejor productividad (Torres-Rojo et al., 2016). A partir de 1992 se adoptó el Método de Desarrollo

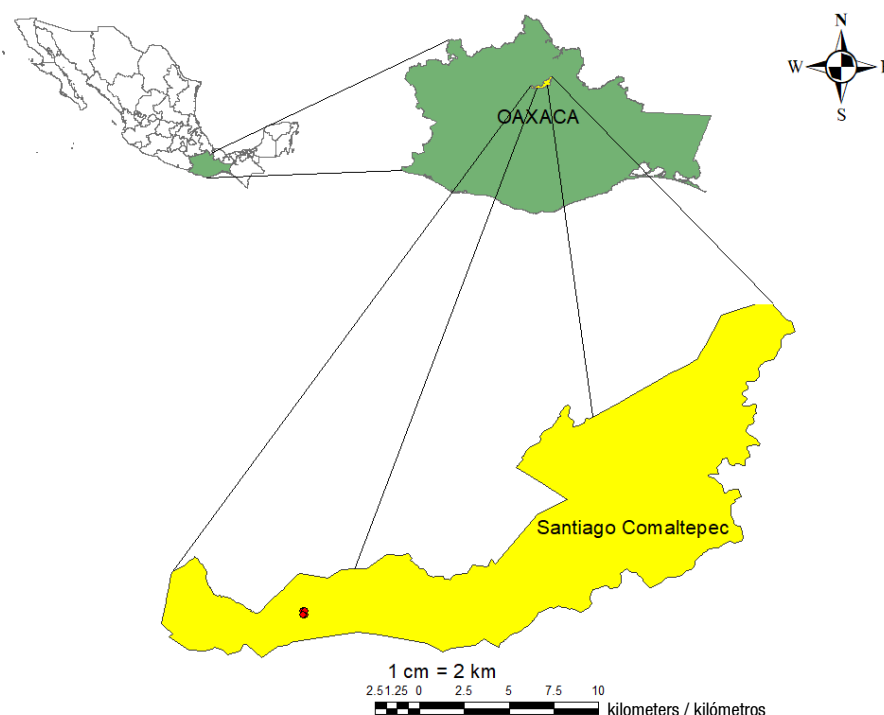


Figure 1. Location of the study site in Santiago Comaltepec, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, Mexico.

Figura 1. Ubicación del sitio de estudio en Santiago Comaltepec, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

and height of the trees, which are the main variables of volume estimation. Given the variation in the dimensions of the trees, they were grouped into four categories (Table 1): very big, big, medium and small. Tree grouping allows a valid comparison between them and serves as a control for covariates that were not observed over time. The ages of trees were only known after the stem analysis.

Some information about the establishment year of trees in each size group is required. The years were as follows: the biggest trees in Group 1 were established from 1903 to 1940 and trees in Group 2, from 1897 to 1941; in these groups, all the trees were born before the selective extraction of long-lived individuals which began in 1956. Trees in Group 3 emerged between 1902 and 1981, and only 12 out of 72 emerged after 1956. Finally, trees of Group 4 were born from 1937 to 1980, and 5 out of 8 emerged after 1956. Of the 98 trees sampled, five belong to Group 1 (very big), 13 to Group 2 (big), 72 to Group 3 (medium size), and 8 to Group 4 (small).

Measurement of diameters and estimation of heights

From the stem analysis data, the height (h_δ), of a tree at age $\delta = 10, 20, \dots, 70$ was estimated by linear interpolation. For that, two ages were selected, one

Silvícola que utiliza la matarrasa y los árboles semilleros, enriquecidos con plántulas trasplantadas, como métodos de regeneración (Roldán-Félix, 2014).

Muestreo y agrupación de árboles

Se tomó una muestra representativa de 98 árboles adultos de *P. patula* para evaluar el crecimiento del diámetro y la altura, que son las principales variables de estimación de volumen. Dada la variación en las dimensiones, los árboles se agruparon en cuatro categorías (Cuadro 1): muy grandes, grandes, medianos y pequeños. La agrupación permite una comparación válida entre ellos y sirve de control de las covariables que no se observaron a lo largo del tiempo. La edad de los árboles solo se conoció después del análisis troncal.

Es necesario disponer de información sobre el año de establecimiento de los árboles de cada grupo según su tamaño. Los años son los siguientes: los árboles más grandes del Grupo 1 se establecieron entre 1903 y 1940, y los del Grupo 2, entre 1897 y 1941; en estos grupos, todos los árboles se establecieron antes de la extracción selectiva de individuos longevos que comenzó en 1956. Los árboles del Grupo 3 surgieron entre 1902 y 1981, y solo 12 de 72 surgieron después de 1956. Por último, los árboles del Grupo 4 nacieron entre 1937 y 1980, y cinco de ocho emergieron después de 1956. De los 98 árboles muestreados, cinco pertenecen al Grupo 1

Table 1. Criteria for grouping trees of *Pinus patula* by height and diameter.**Cuadro 1. Criterios para la agrupación de árboles de *Pinus patula* por altura y diámetro.**

Height category (m)/Categoría altura (m)		Diameter category (cm)/Categoría diámetro (cm)
Group 1/ Grupo 1	Highest tenth part (35-36 m)/ Décima parte más alta (35-36 m)	Highest fourth part (70-80 cm)/ Cuarta parte más alta (70-80 cm)
Group 2/ Grupo 2	(i) Trees located in the tenth decile of the height category, which do not belong to the fourth quartile of diameters; (ii) trees in the fourth quartile of diameters which do not belong to the tenth decile of the height category; (iii) trees located in the ninth decile of the height category and in the third quartile of the diameter category./ (i) Árboles situados en el décimo decil de la categoría altura, que no pertenecen al cuarto cuartil de diámetros; (ii) árboles en el cuarto cuartil de diámetros que no pertenecen al décimo decil de la categoría altura; (iii) árboles situados en el noveno decil de la categoría altura y en el tercer cuartil de la categoría diámetro.	
Group 3/ Grupo 3	Trees that do not meet the criteria of groups 1, 2 or 4./ Árboles que no cumplen los criterios de los grupos 1, 2 o 4	
Group 4/ Grupo 4	Lowest tenth part (9-13 m)./ Primer decil (9-13 m)	Lowest fourth part (15-25 cm)/ Primer cuartil (15-25 cm)

Extremes: trees in the highest tenth of heights and the highest fourth of diameters form Group 1 of the biggest trees. In the contrast, trees in the lowest tenth of heights and the lowest fourth of diameters form Group 4 of smallest trees.

Extremos: los árboles situados en la décima posición más alta de la categoría altura y la cuarta posición más alta de los diámetros forman el Grupo 1 de los árboles más grandes. Por el contrario, los árboles situados en la décima posición más baja de la categoría altura y la cuarta posición más baja de los diámetros forman el Grupo 4 de árboles más pequeños.

upper (u) and one lower (l), with both as close as possible to δ , through the following formula:

$$h_{\delta} = (h_u - h_l) \left(\frac{\delta - A_l}{A_u - A_l} \right) + h_l$$

In this formula, h_u : upper section height; h_l : lower section height; A_u : upper section age; A_l : lower section age. To get the year when the tree reaches age δ , the establishment year (EY) is required, calculated by $EY = CY - A$, where CY is the cutting year and A is the cutting age. For every tree, the value of h_{δ} and the year when the tree reached it (y_{δ}) were recorded.

Diameters were measured directly from rings in each decade for the stump section (at a height of 0.35 m) and section 1 (at a height of 3.02 m), respectively. For the stump section, diameters were also measured when the trees were five years old.

Data analysis

The key idea of the procedure is to track stability in timber production, based on stem analysis data in which sampled trees established in different years were scaled at the same age to be compared. The procedure is easy, intuitive and viable to carry out in both natural forests and plantations, once the stem analyses are available. Furthermore, the proposal immediately signals the effects caused by disturbances in the forest and could therefore reveal whether silvicultural practices, such as thinning, controlled burning or logging, were properly managed. Growth ring data from *P. patula* trees sampled in a pine-oak forest, that has been managed by the Mexican Method of Forest Regulation and the Method for Silvicultural

(muy grandes), 13 al Grupo 2 (grandes), 72 al Grupo 3 (medianos) y ocho al Grupo 4 (pequeños).

Medición de los diámetros y estimación de las alturas

A partir de los datos del análisis troncal, la altura (h_{δ}) de un árbol a la edad $\delta = 10, 20, \dots, 70$ se estimó por interpolación lineal. Para ello, se seleccionaron dos edades, una superior (u) y otra inferior (l), siendo ambas lo más próximas posible a δ , mediante la fórmula siguiente:

$$h_{\delta} = (h_u - h_l) \left(\frac{\delta - A_l}{A_u - A_l} \right) + h_l$$

En esta fórmula, h_u representa la sección superior de la altura; h_l es la sección inferior de la altura; A_u es la sección superior de la edad y A_l representa la sección inferior de la edad. Para obtener el año en que el árbol alcanza la edad δ , se requiere el año de establecimiento (EY), calculado por $EY = CY - A$, donde CY es el año de corte y A es la edad de corte. Para cada árbol se registró el valor h_{δ} y el año en que el árbol lo alcanzó (y_{δ}).

Los diámetros se midieron directamente a partir de los anillos en cada década para la sección del tocón (a una altura de 0.35 m) y la sección 1 (a una altura de 3.02 m), respectivamente. Para la sección del tocón, también se midieron los diámetros cuando los árboles tenían cinco años.

Análisis de datos

La idea clave del procedimiento es rastrear la estabilidad en la producción maderable, con base en datos de análisis troncales en los que los árboles establecidos

Development (Roldán-Félix, 2014; Torres-Rojo et al., 2016), were used to measure whether the timber yield has been sustained.

To assess a posteriori the timber yield sustainability, the diameter and height growth of same-aged trees (established in different years) grouped by size was monitored, using simple regressions. After that, a multiple regression over all the trees was carried out. All the regression analyses were carried out using the R statistical package (R Core Team, 2021).

Models for heights and diameters of same-aged trees grouped by size

Simple linear regressions of heights of trees that belong to the same category when they were of equal age (in decades) against the year when they reached that age were carried out.

The four groups of heights and the first three ones for diameters were analyzed because is expected that the smallest trees come from suppressed conditions, where the diameter growth is more affected (Olivar et al., 2013). For groups 1, 2, and 3, data were available at age $\delta = 10, 20, \dots, 70$, and for Group 4, only four ages ($\delta = 10, 20, 30, 40$) were available. The regression model for height was:

$$h_{\delta j} = a_{\delta} + b_{\delta}y_{\delta j} + e_{\delta j}$$

In this model, $j = 1, 2, \dots, n_{\delta}$, n_{δ} is the number of trees at age δ and $\delta = 10, 20, \dots, 70$; $h_{\delta j}$ = height of j -th tree at age δ ; a_{δ} = intercept for age δ ; b_{δ} = slope for age δ ; $y_{\delta j}$ = year in which the j -th tree reaches the age δ , and $e_{\delta j}$ = error term. The parameter b_{δ} represents the marginal growth of height with respect to the establishment year.

The hypothesis test carried out in each decade-group combination for the dependent variable height was: $H_0: b_{\delta} < 0$ against the alternative $H_a: b_{\delta} \geq 0$. If $b_{\delta} \geq 0$, then, at age δ , the heights of more recently established trees are equal to or greater than those of the earlier established ones and would indicate that timber yield has been sustained; otherwise, if H_0 is not rejected, then there is evidence that timber yield has not been maintained. See Table 2 for the number of observations for each hypothesis test.

Models for the diameters (stump section and section 1), as well as the interpretation of the coefficients, were analogous. For example, the diameter model at the stump section can be written as $d_{\delta j}(\text{stump}) = a_{\delta} + b_{\delta}y_{\delta j} + e_{\delta j}$, where $d_{\delta j}(\text{stump})$ represents the diameter at the stump section of the j -th tree at age δ , with $\delta = 10, 20, \dots, 70$; the other elements of the model have a similar meaning as in the height model, but related with diameter at the stump section. The hypothesis test is also carried out

en años diferentes se escalaron a la misma edad para ser comparados. El procedimiento es fácil, intuitivo y viable para utilizarlo tanto en bosques naturales como en plantaciones, una vez que se dispone de los análisis troncales. Además, el método señala inmediatamente los efectos causados por las perturbaciones en el bosque y, por tanto, podría revelar si las prácticas silvícolas, como el aclareo, la quema controlada o la tala, se manejaron correctamente. Los datos de anillos de crecimiento se obtuvieron de árboles de *P. patula* muestreados en un bosque de pino-encino que ha sido manejado por el Método Mexicano de Ordenación Forestal y el Método de Desarrollo Silvícola (Roldán-Félix, 2014; Torres-Rojo et al., 2016), con el fin de determinar si el rendimiento maderable ha sido sostenido.

La sostenibilidad del rendimiento maderable, *a posteriori*, se evaluó a partir del crecimiento en diámetro y altura de árboles de la misma edad (establecidos en años diferentes) agrupados por tamaño y mediante regresiones simples. Posteriormente, se hizo un análisis de regresión múltiple para todos los árboles. Todos los análisis de regresión se realizaron utilizando el paquete estadístico R (R Core Team, 2021).

Modelos para alturas y diámetros de árboles de la misma edad agrupados por tamaño

Se realizaron regresiones lineales simples de las alturas de los árboles que pertenecían a la misma categoría cuando tenían la misma edad (en décadas) contra el año en que alcanzaron esa edad.

Se analizaron los cuatro grupos de alturas y los tres primeros de los diámetros porque se espera que los árboles más pequeños correspondan a condiciones con supresión, donde el crecimiento del diámetro se ve más afectado (Olivar et al., 2013). Para los grupos 1, 2 y 3 se dispuso de datos a las edades $\delta = 10, 20, \dots, 70$, y para el grupo 4 solo se dispuso de cuatro edades ($\delta = 10, 20, 30$ y 40). El modelo de regresión para la altura fue:

$$h_{\delta j} = a_{\delta} + b_{\delta}y_{\delta j} + e_{\delta j}$$

En este modelo, j es 1, 2, ..., n_{δ} , y n_{δ} es el número de árboles a la edad δ , y δ es 10, 20, ..., 70; $h_{\delta j}$ es la altura del j -ésimo árbol a la edad δ ; a_{δ} es el intercepto para la edad δ ; b_{δ} es la pendiente para la edad δ ; $y_{\delta j}$ es el año en que el j -ésimo árbol alcanza la edad δ , y $e_{\delta j}$ es el término de error. El parámetro b_{δ} representa el crecimiento marginal de la altura en relación con el año de establecimiento.

La prueba de hipótesis en cada combinación década-grupo para la variable dependiente altura fue $H_0: b_{\delta} < 0$ frente a la alternativa $H_a: b_{\delta} \geq 0$. Si $b_{\delta} \geq 0$, entonces, a la edad δ , las alturas de los árboles establecidos recientemente son iguales o mayores que las de los

Table 2. Number of observations included in the models of the three studied variables of *Pinus patula* trees.Cuadro 2. Número de observaciones incluidas en los modelos de las tres variables estudiadas de los árboles de *Pinus patula*.

Group/ Grupo	Age/Edad								Total by group/ Total por grupo
	5	10	20	30	40	50	60	70	
Heights/Alturas									
1	–	5	5	5	5	5	5	4	34
2	–	13	13	13	13	13	13	12	90
3	–	72	72	70	67	60	55	40	436
4	–	8	8	7	4	–	–	–	27
Total by age/ Total por edad		98	98	95	89	78	73	56	587
Diameters at the stump section/Diámetros en la sección del tocón									
1	5	5	5	5	5	5	5	4	39
2	13	13	13	13	13	13	13	12	103
3	72	72	72	70	67	60	55	41	509
Total by age/ Total por edad	90	90	90	88	85	78	73	57	651
Diameters at section 1/Diámetros en la sección 1									
1	–	5	5	5	5	5	5	4	34
2	–	10	13	13	13	13	13	12	87
3	–	51	72	70	67	60	55	41	416
Total by age/ Total por edad		66	90	88	85	78	73	57	537

Examples to manage the table: For a simple regression on heights for group 2 and age 40, 13 observations were used; for multiple regression of diameter at the stump section, 651 observations were used.

Ejemplos para manejar el cuadro: Para una regresión simple de las alturas para el grupo 2 y la edad de 40 años, se utilizaron 13 observaciones; para una regresión múltiple del diámetro en la sección del tocón se utilizaron 651 observaciones.

on the parameter b_δ , which in the model of diameter represents the marginal growth of diameter with respect to the establishment year.

Models for heights and diameters considering all trees

An additional analysis using all the trees in a model that implicitly grouped them by age δ was performed. This analysis also makes the hypothesis testing on c_h stronger, due to the increase in the error degrees of freedom. The multiple regression model for height was:

$$h_{\delta j} = a_h + b_h \frac{1}{\delta} + c_h y_{\delta j} + e_{\delta j}$$

with $j = 1, 2, \dots, n_\delta$ and $\delta = 10, 20, \dots, 70$; where $y_{\delta j}$ is the year when the j -th tree reaches the age δ , a_h is a general intercept, b_h is a parameter that relates height to age, and c_h is a parameter of the marginal growth by year. Note that from a_h and b_h , a particular ordinate is obtained for each age δ , $a_\delta = a_h + \frac{b_h}{\delta}$, so the estimated regression line for heights at a specific age δ is $\hat{h}_{\delta j} = \hat{a}_\delta + \hat{c}_h y_{\delta j}$. The hypothesis tests required is on the parameter c_h , which corresponds to the year when the tree reaches age δ : $H_0: c_h < 0$ versus $H_a: c_h \geq 0$. If H_0 is rejected, it will mean that more recently established

establecidos previamente e indicaría que el rendimiento maderable se ha mantenido; en caso contrario, si no se rechaza H_0 , entonces hay evidencia de que el rendimiento maderable no se ha mantenido. El Cuadro 2 indica el número de observaciones para cada prueba de hipótesis.

Los modelos para los diámetros (sección del tocón y sección 1), así como la interpretación de los coeficientes, fueron análogos. Por ejemplo, el modelo para el diámetro en la sección del tocón puede expresarse como $d_{\delta j}$ (tocón) = $a_\delta + b_{\delta j} y_{\delta j} + e_{\delta j}$; donde $d_{\delta j}$ (tocón) representa el diámetro en la sección del tocón del j -ésimo árbol a la edad δ , con $\delta = 10, 20, \dots, 70$; los demás elementos del modelo tienen un significado similar al del modelo de altura, pero relacionado con el diámetro en la sección del tocón. La prueba de hipótesis se realiza también sobre el parámetro b_δ , que en el modelo de diámetro representa el crecimiento marginal del diámetro respecto al año de establecimiento.

Modelos para alturas y diámetros considerando todos los árboles

Se realizó un análisis adicional utilizando todos los árboles en un modelo que los agrupaba de manera implícita por edad δ . Este análisis también refuerza

trees reach, at the same age, a height equal to or greater than those that emerged earlier. Otherwise, if $c_h < 0$, the heights growth, as well as the timber yield, exhibit signs of not being sustained.

The regression models for the diameters at the stump section and section 1, as well as the interpretation of the coefficients, are analogous. That is, the multiple regression model for diameter at the stump section of the j -th tree, with $j = 1, 2, \dots, n_\delta$, at age $\delta = 10, 20, \dots, 70$, $d_{\delta j}$ (stump), was $d_{\delta j}(\text{Stump}) = a_h + b_h \frac{1}{\delta} + c_h y_{\delta j} + e_{\delta}$. As with the height model, the test of the hypothesis of interest is on the parameter c_h , which corresponds to the year when the tree reaches age δ .

A schematic representation of the steps to estimate whether the timber yield has been sustained is presented in Figure 2.

Forest manager interviews

Since management approach is relevant to preserve forest land, some forest managers were contacted to request their opinion on the forest development of the study area in the last 30 years, to compare them with the results obtained in this investigation. The questions were focused on the management of the forest, wood quality, composition of species and their general perception over changes in the forest.

Results

Patterns of heights and diameters of same-aged trees grouped by size

Height

In the height patterns of trees for group 2, clustered by decades (Figure 3), it is evident that all the slopes are positive and the slopes of the models for older trees are greater than those for the younger ones. This finding implies that more recently established trees not only grew faster, but their marginal growth were greater at 60 or 70 years old than at 10 or 20 years old.

Slopes for height models appears in Figure 4 for all groups and each decade within them. Non-negative trends are observed for all trees (Figures 4A, 4D, 4G, 4J). The corresponding P -values of the tests are in Table 3. Comparing the estimation of the slope value for each age in the four groups of trees, only one is negative but not significant; the rest of them are positive, half of these are highly significant, so the height dimension remains at the same level or bigger.

The height patterns in Groups 1 and 2, to which the tallest trees belong, are very similar (Figures 4A and 4D). In Group 1 (Figure 4A), the biggest slope happened

la prueba de hipótesis de un c_h más fuerte, debido al aumento de los grados de libertad del error. El modelo de regresión múltiple para la altura fue el siguiente:

$$h_{\delta j} = a_h + b_h \frac{1}{\delta} + c_h y_{\delta j} + e_{\delta j}$$

con $j = 1, 2, \dots, n_\delta$ y $\delta = 10, 20, \dots, 70$; donde $y_{\delta j}$ es el año cuando el j -ésimo árbol alcanzó la edad δ , a_h es un intercepto general, b_h es un parámetro que relaciona la altura con la edad y c_h es un parámetro del crecimiento marginal por año. A partir de a_h y b_h se obtiene una ordenada particular para cada edad δ , $a_\delta = a_h + \frac{b_h}{\delta}$, por lo que la recta de regresión estimada para las alturas a una edad específica δ es $\hat{h}_{\delta j} = \hat{a}_\delta + \hat{c}_h y_{\delta j}$. La prueba de hipótesis deseada se refiere al parámetro c_h que corresponde al año en que el árbol alcanza la edad δ : $H_0: c_h < 0$ versus $H_a: c_h \geq 0$. Si se rechaza H_0 significará que los árboles establecidos más recientemente alcanzan, a la misma edad, una altura igual o superior a los que surgieron antes. En caso contrario, si $c_h < 0$, entonces el crecimiento en altura, así como el rendimiento maderable, muestran signos de que no están siendo sostenidos.

Los modelos de regresión para los diámetros en la sección del tocón y en la sección 1, así como la interpretación de los coeficientes, son análogos; es decir, el modelo de regresión múltiple para el diámetro en la sección del tocón del j -ésimo árbol, con $j = 1, 2, \dots, n_\delta$, a la edad $\delta = 10, 20, \dots, 70$, fue $d_{\delta j}(\text{tocón}) = a_h + b_h \frac{1}{\delta} + c_h y_{\delta j} + e_{\delta j}$. Al igual que con el modelo de altura, la prueba de hipótesis de interés se realiza sobre el parámetro c_h que corresponde al año en que el árbol alcanza la edad δ .

La Figura 2 presenta un esquema de los pasos necesarios para estimar si el rendimiento maderable ha sido sostenido.

Entrevistas con gestores forestales

Dado que el enfoque de la gestión es relevante para preservar los terrenos forestales, se entabló contacto con algunos administradores forestales para solicitar su opinión sobre la evolución forestal de la zona de estudio en los últimos 30 años y así compararla con los resultados de esta investigación. Las preguntas se centraron en la gestión del bosque, la calidad de la madera, la composición de las especies y la percepción general sobre los cambios en el bosque.

Resultados

Patrones de alturas y diámetros de árboles de la misma edad agrupados por tamaño

Altura

En los patrones de altura de los árboles del grupo 2 (Figura 3) es evidente que todas las pendientes son positivas y que las pendientes de los modelos de

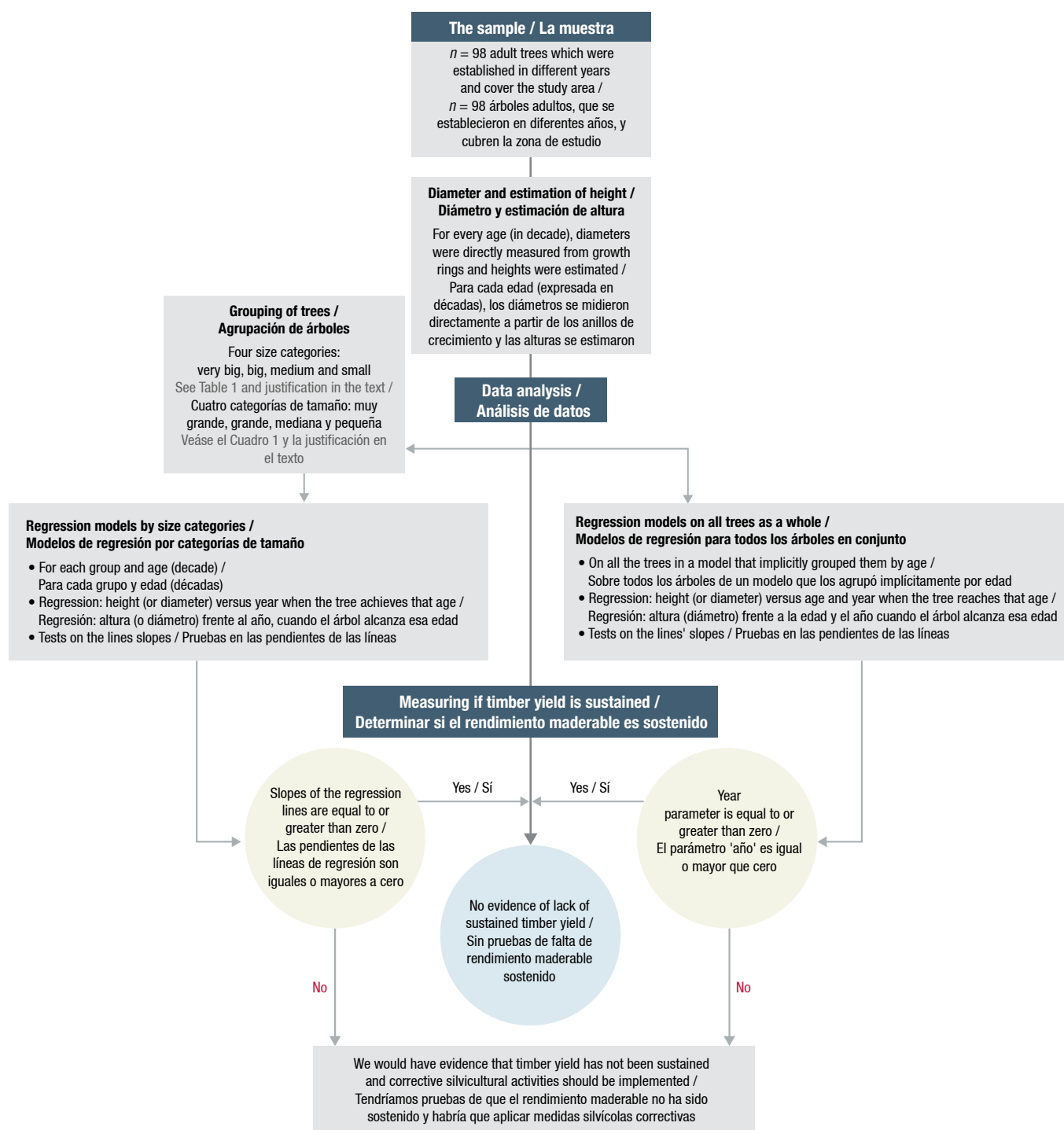


Figure 2. Schematic representation of timber yield monitoring. After having the heights and diameters, there are two alternatives to measure if timber yield is sustained: by tracking the heights and diameters reached by same-aged trees (established in different years) grouped by size or by tracking such dimensions considering all trees as a whole.

Figura 2. Representación esquemática del seguimiento del rendimiento maderable. Tras disponer de las alturas y diámetros, existen dos alternativas para medir si el rendimiento maderable es sostenido: mediante el seguimiento de las alturas y diámetros alcanzados por árboles de la misma edad (establecidos en años diferentes) agrupados por tamaño o mediante el seguimiento de dichas dimensiones considerando todos los árboles en su conjunto.

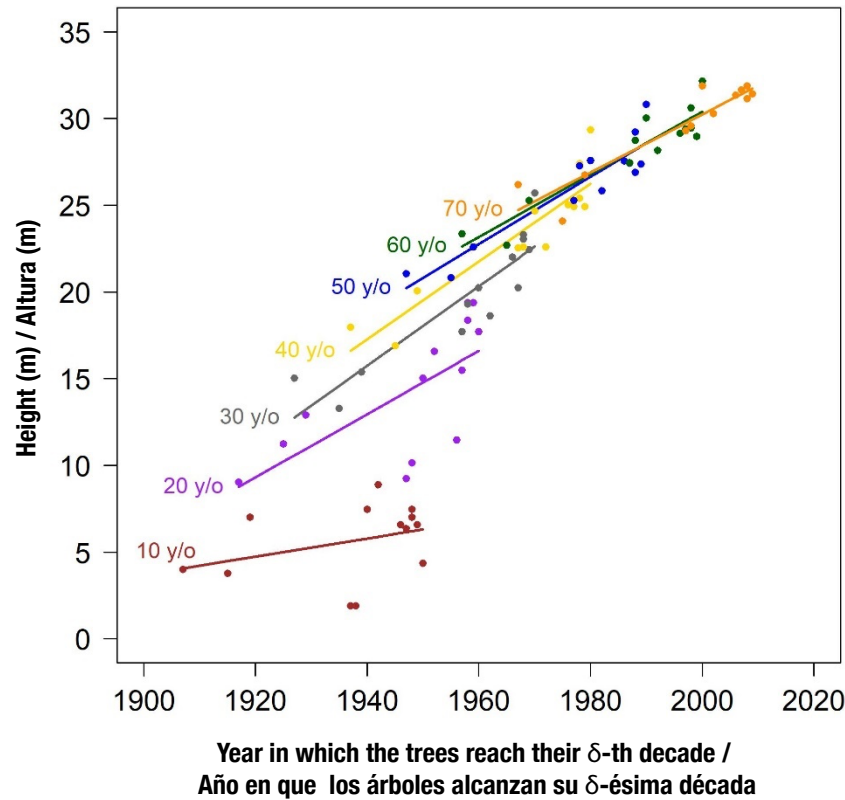
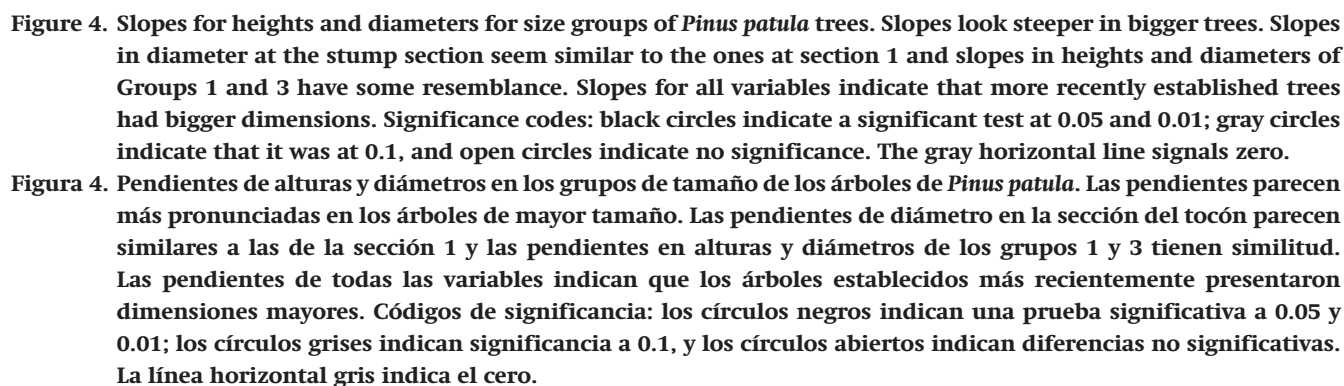


Figure 3. Height growth trends grouped by decades for *Pinus patula* trees of Group 2. No tree age has a negative slope; thus, the average height is maintained, at least, as in the beginning of logging, and consequently, a forest deterioration did not happen. The fitted regression equations $\hat{h}_{\delta j} = \hat{a}_{\delta} + \hat{b}_{\delta} \hat{y}_{\delta j}$, for age $\delta = 10, 20, \dots, 70$ years old (y/o), are: $\hat{h}_{10j} = -70.543 + 0.0392 \hat{y}_{10j}$, $\hat{h}_{20j} = -258.86 + 0.1399 \hat{y}_{20j}$, $\hat{h}_{30j} = -379.3 + 0.2037 \hat{y}_{30j}$, $\hat{h}_{40j} = -378.3 + 0.2043 \hat{y}_{40j}$, $\hat{h}_{50j} = -357.63 + 0.1940 \hat{y}_{50j}$, $\hat{h}_{60j} = -328.2 + 0.1792 \hat{y}_{60j}$, $\hat{h}_{70j} = -298.3 + 0.1642 \hat{y}_{70j}$. Height growth of trees in Group 1 had similar pattern as in Group 2.

Figura 3. Tendencias de crecimiento en altura agrupadas por décadas para los árboles de *Pinus patula* del Grupo 2. Ninguna edad de los árboles tiene pendiente negativa; por lo tanto, la altura media se mantiene, al menos como al principio del aprovechamiento y, en consecuencia, no se produjo deterioro del bosque. Las ecuaciones de regresión ajustadas $\hat{h}_{\delta j} = \hat{a}_{\delta} + \hat{b}_{\delta} \hat{y}_{\delta j}$, para la edad $\delta = 10, 20, \dots, 70$ años (y/o), son: $\hat{h}_{10j} = -70.543 + 0.0392 \hat{y}_{10j}$, $\hat{h}_{20j} = -258.86 + 0.1399 \hat{y}_{20j}$, $\hat{h}_{30j} = -379.3 + 0.2037 \hat{y}_{30j}$, $\hat{h}_{40j} = -378.3 + 0.2043 \hat{y}_{40j}$, $\hat{h}_{50j} = -357.63 + 0.1940 \hat{y}_{50j}$, $\hat{h}_{60j} = -328.2 + 0.1792 \hat{y}_{60j}$, $\hat{h}_{70j} = -298.3 + 0.1642 \hat{y}_{70j}$. El crecimiento en altura de los árboles del Grupo 1 tuvo un patrón similar al del Grupo 2.

Table 3. Slopes and P-values for height models by groups and decades of *Pinus patula* trees.
Cuadro 3. Pendientes y valores P para los modelos de altura por grupos y décadas de los árboles de *Pinus patula*.

Age / Edad	Group 1 / Grupo 1		Group 2 / Grupo 2		Group 3 / Grupo 3		Group 4 / Grupo 4	
	Slope / Pendiente	P-value / Valor P	Slope / Pendiente	P-value / Valor P	Slope / Pendiente	P-value / Valor P	Slope / Pendiente	P-value / Valor P
10	0.0732	0.1796	0.0392	0.3446	0.0005	0.9831	0.0118	0.7259
20	-0.0052	0.9232	0.1399	0.0011	0.0308	0.1886	0.0628	0.0735
30	0.1186	0.0341	0.2037	<0.0001	0.0485	0.0630	0.0210	0.5806
40	0.2002	0.0008	0.2043	<0.0001	0.0541	0.0691	0.0407	0.5483
50	0.2199	0.0003	0.1940	<0.0001	0.0365	0.4001	-	-
60	0.1429	0.0121	0.1792	<0.0001	0.0952	0.0687	-	-
70	0.1549	0.0130	0.1642	0.0004	0.1332	0.0367	-	-



in the fifth decade, while in Group 2 (Figure 4D), it occurred in the fourth. The species reaches its maximum size around these ages. As an example of the tests of hypotheses on height for a specific age and group of trees, see Appendix 1. In Group 3, the positive slopes (Figure 4G) show a weak significant difference to zero between the decades 3 and 6, except the 5th.

Diameter

For the three groups of trees, section 1 has similar diameter slopes to the ones on the stump section (Figures 4B and 4C, 4E and 4F, 4H and 4I). As with the height's development, the most recently established trees in Groups 1 and 2 had larger diameter increments; however, for Group 3, this trend is only observed in ages 60 and 70. This claim is supported by the statistical significance for the slopes in each section, group, and age, shown in Table 4; therefore, the dimensions of diameters both at stump section and section 1 remain at the same level or bigger. Regarding the value of the slope for each age in the three groups of trees analyzed, four of them are negative but not significant, except one at 10 years; this significance disappears in later ages. There are 18 positive slopes, of which 15 are highly significant. Regarding the value of the slope for each age in the three groups of trees analyzed, five of them are negative but not significant. There are 16 positive slopes, of which 12 are highly significant.

los árboles más viejos son mayores que las de los más jóvenes. Este hallazgo implica que los árboles establecidos más recientemente no solo crecieron más rápido, sino que su crecimiento marginal fue mayor a los 60 o 70 años que a los 10 o 20 años.

Las pendientes de los modelos de altura aparecen en la Figura 4 para todos los grupos y cada década. Se observan tendencias no negativas para todos los árboles (Figuras 4A, 4D, 4G, 4J). Los valores *P* de las pruebas se indican en el Cuadro 3. Con respecto a los valores estimados de la pendiente para cada edad en los cuatro grupos de árboles, solo uno es negativo, pero no significativo; los restantes son positivos, la mitad son altamente significativos, por lo que la dimensión altura se mantiene al mismo nivel o mayor.

Los patrones de altura en los Grupos 1 y 2, donde se encuentran los árboles más altos, son similares (Figuras 4A y 4D). En el Grupo 1 (Figura 4A), la pendiente más grande se produjo en la quinta década, mientras que en el Grupo 2 (Figura 4D) se produjo en la cuarta. La especie alcanza su tamaño máximo en torno a estas edades. Como ejemplo de las pruebas de hipótesis de altura para una edad y un grupo de árboles específicos, véase el Apéndice 1. En el Grupo 3, las pendientes positivas (Figura 4G) muestran diferencia poco significativa (*P* < 0.1) con respecto a 0 entre la tercera y sexta década, excepto la quinta que no fue significativa.

Table 4. Slopes and *P*-values for diameter models, by section, group and age of *Pinus patula* trees.
Cuadro 4. Pendientes y valores *P* para los modelos de diámetro, por sección, grupo y edad de los árboles de *Pinus patula*.

Age/ Edad	Group 1/Grupo 1		Group 2/Grupo 2		Group 3/Grupo 3	
	Slope/ Pendiente	P-value/ Valor <i>P</i>	Slope/ Pendiente	P-value/ Valor <i>P</i>	Slope/ Pendiente	P-value/ Valor <i>P</i>
Stump section (at 0.35 m)/Sección del tocón (0.35 m)						
5	0.0463	0.7152	0.0234	0.7723	-0.0246	0.5918
10	0.2482	0.0574	0.1811	0.0275	-0.0911	0.0480
20	0.4151	0.0024	0.2649	0.0013	-0.0891	0.0529
30	0.4875	0.0005	0.2700	0.0012	-0.0477	0.3507
40	0.5641	<0.0001	0.2687	0.0013	0.0010	0.9863
50	0.5406	0.0002	0.2838	0.0007	0.0534	0.5306
60	0.5098	0.0003	0.3328	<0.0001	0.2790	0.0067
70	0.5298	0.0006	0.4807	<0.0001	0.3502	0.0052
Section 1 (at 3.02 m)/Sección 1 (3.02 m)						
10	0.1932	0.1629	0.1076	0.2227	-0.0629	0.2497
20	0.3453	0.0162	0.2142	0.0139	-0.0635	0.1657
30	0.4715	0.0016	0.2321	0.0079	-0.0429	0.3991
40	0.5579	0.0003	0.2472	0.0048	-0.0080	0.8907
50	0.4360	0.0032	0.2379	0.0077	-0.0052	0.9513
60	0.4015	0.0060	0.2264	0.0095	0.1525	0.1355
70	0.3449	0.0272	0.3707	0.0001	0.2130	0.0870

Negative slopes are not significant at the 0.05 level, except for the stump section during the first decade.

In Figure 5A, diameters clusters are presented for the stump section at all ages, for trees in Group 2. The slopes for trees in Group 1 are similar to Group 2 (Figures 4B and 4E). Figure 5B shows the fitted lines for diameter at the stump section for Group 3, which is the biggest conglomerate of trees. There is a smooth change in the slopes over time, from negative to positive,

Diámetro

Para los tres grupos de árboles, la sección 1 presenta pendientes diamétricas similares a las de la sección del tocón (Figuras 4B y 4C, 4E y 4F, 4H y 4I). Al igual que con el desarrollo de la altura, los árboles establecidos más recientemente en los Grupos 1 y 2 tuvieron incremento mayor de diámetro; sin embargo, para el Grupo 3, esta tendencia solo se observa en las edades de 60 y 70 años. Esta afirmación se ve apoyada por la significancia

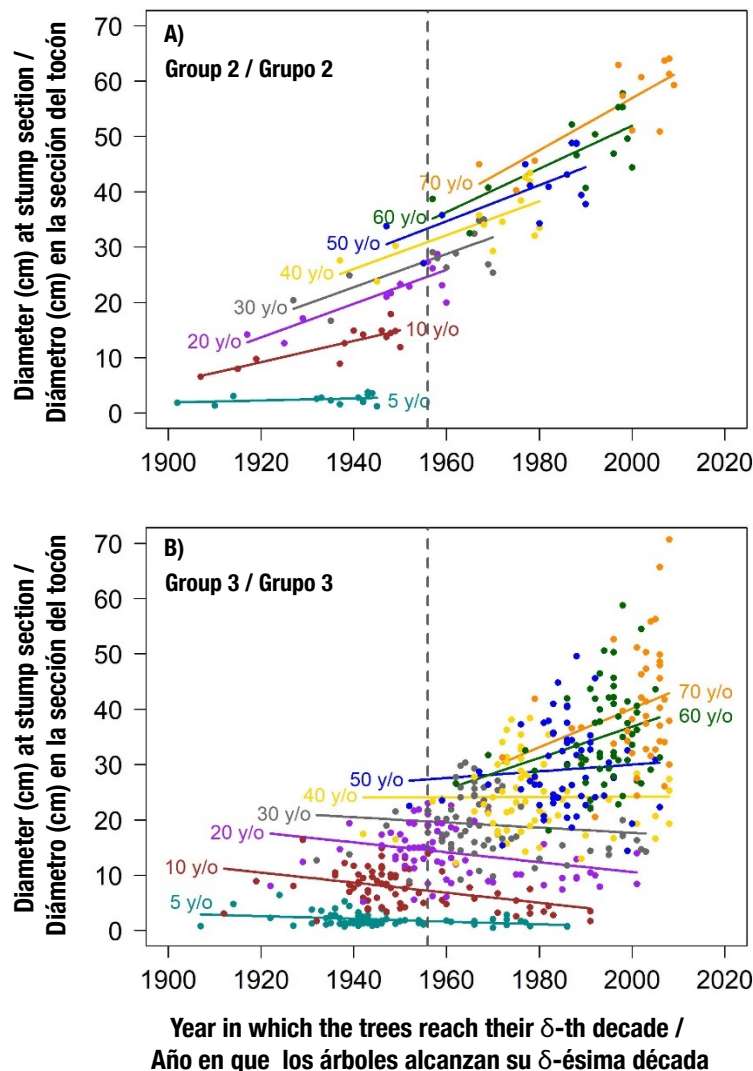


Figure 5. Estimated regression lines for diameter at the stump section for *Pinus patula* trees in Group 2 and Group 3. Patterns in trees of Group 1 are similar to the pattern in trees of Group 2. For Group 3, diameter patterns at section 1 are similar to the patterns of the diameter at the stump section. The majority of slopes in Groups 2 and 3 are statistically different from zero (most with a positive sign). The gray dashed vertical line indicates year 1956, when the extraction of trees started. y/o: years old.

Figura 5. Rectas de regresión estimadas para el diámetro en la sección del tocón de los árboles de *Pinus patula* del Grupo 2 y del Grupo 3. Los patrones en los árboles del Grupo 1 son similares a los patrones en los árboles del Grupo 2. Para el Grupo 3, los patrones del diámetro en la sección 1 son similares a los patrones del diámetro en la sección del tocón. La mayoría de las pendientes en los Grupos 2 y 3 son estadísticamente distintas de 0 (la mayoría con signo positivo). La línea vertical discontinua gris indica el año 1956, cuando inició la extracción de árboles. y/o: años.

between decades 4 and 5; however, the magnitude of the positive slopes is greater than the negative ones (Figure 4H). Comparing the first three groups, slopes for heights and diameters were, in general, bigger in Group 1, followed by Groups 2 and 3 (Figure 4).

Models for heights and diameters considering all trees

In the multiple regression model that includes all the trees, the estimated lines for heights, diameter at the stump section, and diameter at section 1 are, respectively:

$$\hat{h}_{\delta j} = -114.81 - \frac{210.91}{\delta} + 0.071 y_{\delta j}$$

$$\hat{d}_{\delta j}(\text{Stump}) = -437.82 - \frac{122.87}{\delta} + 0.237 y_{\delta j}$$

$$\hat{d}_{\delta j}(\text{Section 1}) = -252.42 - \frac{257.33}{\delta} + 0.144 y_{\delta j}$$

From the general model of each variable, it can be generated a particular equation for each age; the corresponding equations for height and diameter at the stump section are in Figure 6. The diameter growth in the stump (Figure 6B) was similar to the diameter in Section 1.

The relevant hypothesis testing is on the year parameter related with the variable $y_{\delta j}$, whose results are presented in Table 5. Both the individual tests (Table 5) and the respective joint tests, for the three response variables of interest, are highly significant. Appendix 2 shows an example of the height hypothesis test for the model that includes all trees, regardless of size grouping. Tests for diameters were done in a similar way.

The results of comparing diameters and height of same-aged trees coincide with those that managers know about the forest development during the time involved. In addition, managers agree that species composition and densities have been approximately at same level.

Discussion

The regeneration methods used in the study area were the Mexican Method of Forest Regulation and the Silvicultural Development Method (Roldán-Félix, 2014; Torres-Rojo et al., 2016). The management has had a positive influence in maintaining the density of individuals and the species richness and composition, which has meant an economic spillover for the communities involved with the forest harvest; this was certified by the Rainforest Alliance since 1989 (Robson, 2009; Roldán-Félix, 2014). Beyond that, with the procedure proposed here, the suitability of silvicultural

estadística para las pendientes en cada sección, grupo y edad, mostrada en el Cuadro 4. En la sección del tocón de los tres grupos de árboles, hay 18 pendientes positivas, de las cuales 15 son altamente significativas ($P < 0.01$), y cuatro son negativas pero no significativas ($P > 0.05$), excepto una a los 10 años; esta significancia desaparece en edades posteriores. En la sección 1, en los tres grupos de árboles, cinco valores de la pendiente son negativas, pero no significativas ($P > 0.05$); hay 16 pendientes positivas, de las cuales 12 son altamente significativas ($P < 0.01$).

En la Figura 5A se muestran los conglomerados de diámetros en la sección del tocón a todas las edades, para los árboles del Grupo 2. Las pendientes de los árboles del Grupo 1 son similares a las del Grupo 2 (Figuras 4B y 4E). La Figura 5B muestra las rectas ajustadas para el diámetro en la sección del tocón para el Grupo 3, que es el mayor conglomerado de árboles. Hay un cambio suave en las pendientes a lo largo del tiempo, de negativas a positivas, entre la cuarta y quinta década; sin embargo, la magnitud de las pendientes positivas es mayor que la de las negativas (Figura 4H). Si se comparan los tres primeros grupos, las pendientes de alturas y diámetros fueron, en general, mayores en el Grupo 1, seguido de los Grupos 2 y 3 (Figura 4).

Modelos para alturas y diámetros considerando todos los árboles

En el modelo de regresión múltiple que incluye todos los árboles, las rectas estimadas para las alturas, el diámetro en la sección del tocón y el diámetro en la sección 1 son respectivamente:

$$\hat{h}_{\delta j} = -114.81 - \frac{210.91}{\delta} + 0.071 y_{\delta j}$$

$$\hat{d}_{\delta j}(\text{tocón}) = -437.82 - \frac{122.87}{\delta} + 0.237 y_{\delta j}$$

$$\hat{d}_{\delta j}(\text{Sección 1}) = -252.42 - \frac{257.33}{\delta} + 0.144 y_{\delta j}$$

A partir del modelo general de cada variable se puede generar una ecuación particular para cada edad; las ecuaciones correspondientes para la altura y el diámetro en la sección del tocón se encuentran en la Figura 6. El crecimiento del diámetro en el tocón (Figura 6B) fue similar al diámetro en la sección 1.

La prueba de hipótesis relevante es sobre el parámetro del año relacionado con la variable $y_{\delta j}$, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 5. Tanto las pruebas individuales (Cuadro 5) como las pruebas conjuntas, para las tres variables de respuesta de interés, son altamente significativas. En el Apéndice 2 se muestra un ejemplo de la prueba de hipótesis de altura para el modelo que incluye todos los árboles, independientemente de la agrupación por tamaños. Las pruebas para los diámetros se realizaron de forma similar.

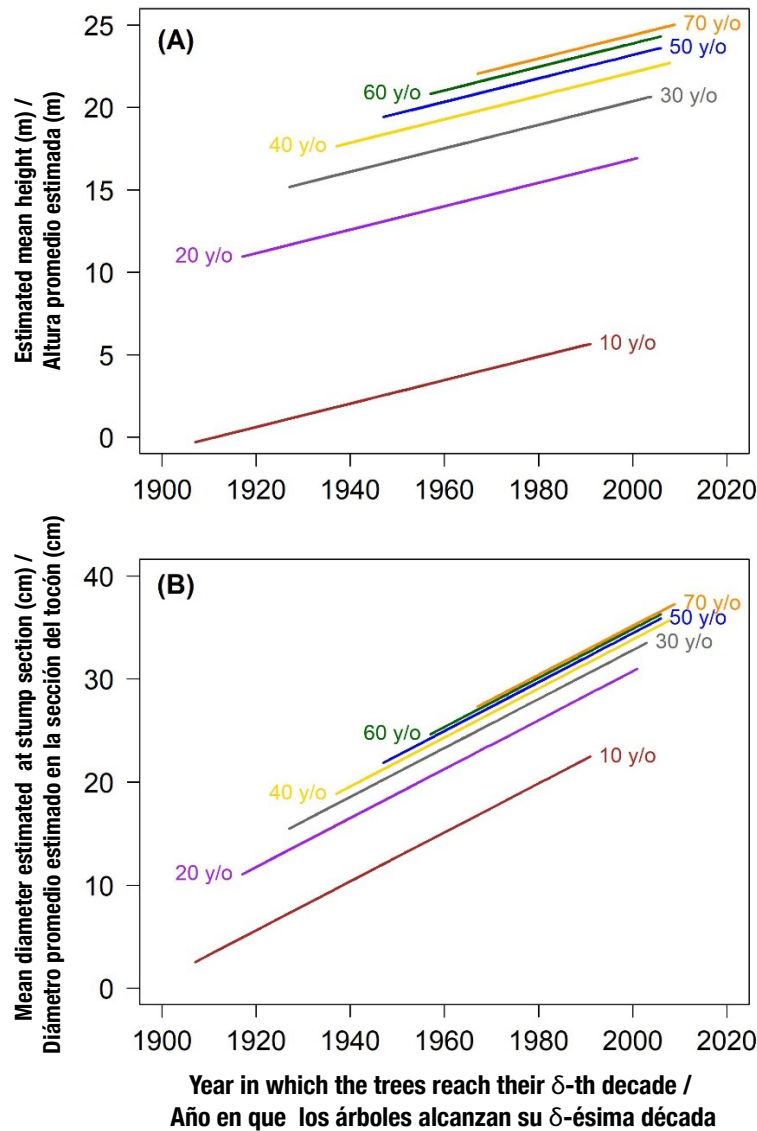


Figure 6. Estimated regression lines from the regression model including all the *Pinus patula* trees. (A) Regression lines for heights. (B) Regression lines for diameters at the stump section. In both cases, from the general fitting on all the trees, equations were generated for ages of 10, 20, ..., 70 years old (y/o); the estimated general mean (intercept) increases as age increases and the slopes are positive.

Figura 6. Rectas de regresión estimadas a partir del modelo de regresión que incluye todos los árboles de *Pinus patula*. (A) Rectas de regresión para alturas. (B) Rectas de regresión para diámetros en la sección del tocón. En ambos casos, a partir del ajuste general en todos los árboles, se generaron ecuaciones para las edades de 10, 20, ..., 70 años (y/o); la media general estimada (interceptada) aumenta a medida que aumenta la edad y las pendientes son positivas.

Table 5. Individual hypothesis tests on the year parameter, for heights and diameters of *Pinus patula*.

Cuadro 5. Pruebas de hipótesis individuales en el parámetro del año, para alturas y diámetros de *Pinus patula*.

Response variable/ Variable de respuesta	Year estimate/ Estimación anual	Standard error/ Error estándar	t value/ Valor t	Pr(> t)
Height/Altura	0.071	0.011	6.346	4.44E-10
Diameter at stump/ Diámetro del tocón	0.237	0.021	11.300	<2E-16
Diameter at section 1/ Diámetro en sección 1	0.144	0.024	6.052	2.69E-09

In all cases, the respective joint regression test was highly significant ($Pr > F < 2.2E-16$).

En todos los casos, las pruebas conjuntas de regresión respectivas fueron altamente significativas ($Pr > F < 2.2E-16$).

practices, such as thinning, logging, and reforestation, can be monitored, depending on the management method used. Regardless of management practice, the proposed procedure tracks what happens after logging, any other silvicultural activity or disturbance. That implies, that the suggested procedure to assess timber yield also complements the approaches of forest management and predictions of logging, in the pursuit of ensuring a sustainable forest management.

Timber production can only be sustained if the trees remaining, after the first harvest, grow at rates fast enough to provide a harvestable volume in the second cutting cycle that is similar to the first harvest (Dauber et al., 2005). Based in the positive slopes of all studied variables and their statistical significance, there is evidence to expect similar or bigger volumes in the next logging; this is true as long as mortality remains stable but, in this case, managers confirmed that this is what happened. This is true in both cases, when the analysis was performed by height and diameter groups and when the data were analyzed on all trees, regardless of such groups. Therefore, it can be concluded that the timber yield in the study area has been sustained.

Patterns of heights and diameters of same-aged trees grouped by size

In Groups 1, 2, and 3, it was observed a better height's development on recently established trees and such development was greater in the last two decades than in the first two ones (Figures 3 and 4). In the same way, the positive slope values in the first six decades imply a stable-height improvement; and the slope for decade 7 validates this improvement. These facts indicate possible enhancements in growing conditions for the heights due to silvicultural treatments and the absorption of atmospheric carbon (Brienen et al., 2020; Olivar et al., 2013). However, increased growth rates can shorten the lifespan of trees or increase the mortality rate of canopy trees, so long-term forest monitoring should be carried out (Brienen et al., 2020). Regarding Group 4, even with low light availability, the positive slopes show suitable conditions for trees that emerged lately.

An analysis of diameter growth trends from same-aged trees, established in different years, results relevant because diameter is one of the two variables which determines how much wood can be extracted from the forest (Santiago-García et al., 2017). Figures 4B, 4C, 4E, and 4F, reveal the sustained timber yield, due to positive slopes, almost all statistically significant. These larger trees of Groups 1 and 2 display better such condition because they share similar silvicultural and genetic characteristics, based on the tree grouping. However, in smaller trees, diameter growth is more

Los resultados de la comparación de diámetros y alturas de árboles de la misma edad coinciden con los que los encargados de la gestión conocen sobre la evolución del bosque durante ese tiempo. Además, los silvicultores coinciden en que la composición de especies y las densidades se han mantenido aproximadamente al mismo nivel.

Discusión

Los métodos de regeneración utilizados en el área de estudio fueron el Método Mexicano de Ordenamiento Forestal y el Método de Desarrollo Silvícola (Roldán-Félix, 2014; Torres-Rojo et al., 2016). El manejo ha ejercido influencia positiva en el mantenimiento de la densidad de los individuos y la riqueza y composición de especies, lo que ha significado una derrama económica para las comunidades involucradas con el aprovechamiento forestal; esto fue certificado por Rainforest Alliance desde 1989 (Robson, 2009; Roldán-Félix, 2014). Más allá de esto, con el procedimiento propuesto en este estudio se puede hacer un seguimiento de la idoneidad de las prácticas silvícolas como el aclareo, la tala y la reforestación, según el método de manejo utilizado. Independientemente de la práctica de manejo, el procedimiento propuesto rastrea lo que sucede después de la tala, cualquier otra actividad silvícola o perturbación. Esto implica que el procedimiento sugerido para la evaluación del rendimiento maderable también complementa los enfoques de la gestión forestal y las predicciones de tala en la búsqueda de garantizar un manejo forestal sostenible.

La producción de madera solo se puede sostener si los árboles restantes, tras la primera tala, crecen a tasas lo suficientemente rápidas como para proporcionar un volumen aprovechable en el segundo ciclo de corta que sea similar al de la primera tala (Dauber et al., 2005). Con base en las pendientes positivas de todas las variables estudiadas y en su significancia estadística, existen pruebas para esperar volúmenes similares o mayores en la siguiente tala, siempre que la mortalidad se mantenga estable, aunque en este caso los gestores confirmaron que así ocurrió. Esto es cierto en ambos casos, cuando el análisis se realizó según los grupos de altura y diámetro y cuando los datos se analizaron sobre todos los árboles en conjunto, independientemente de dichos grupos. Por lo tanto, se puede concluir que el rendimiento maderable en la zona de estudio se ha mantenido.

Patrones de alturas y diámetros de árboles de la misma edad agrupados por tamaño

En los Grupos 1, 2 y 3 se observó un mejor desarrollo de la altura en los árboles recientemente establecidos y este fue mayor en las dos últimas décadas que en las primeras dos (Figuras 3 y 4). Del mismo modo, los valores positivos de la pendiente en las seis primeras décadas implican una mejora estable de la altura;

affected than the height and have a bigger competition (Olivar et al., 2013). The group with the largest number of trees (Group 3) also showed sustained yield according to the suggested criterion.

The greatest slopes for heights and diameters of the largest trees in Groups 1 and 2 (Figure 4) explain the different conditions between these groups, and those of Group 3. This pattern happens possibly because dominant height is least affected by changes in density, resulting by intermediate silvicultural treatments as thinning (Olivar et al., 2013; Santiago-García et al., 2017). As Olivar et al. (2013) indicates, the thinning of selected trees increases the growing space available for the remaining individuals to be harvested later. Group 1 individuals were the first to take advantage of the removal of others; after cutting the tallest individuals, Group 2 trees, second in size, began to have this advantage and therefore their slopes continue to grow longer.

Models for heights and diameters regardless of tree size groups

The results of the models taking into account all the trees as a whole support what was found for height and diameter within the tree size groups. The estimated general mean (intercept) of both height and diameter increases as age increases, and the positive slopes of the regression lines exhibit that the more recently established trees grow more on average (Figure 6). Trees grew approximately three times taller in 10–20 years than in 20–30 years, and so on (Figure 6A).

The evidence confirmed that the timber yield has been sustained. The positive slopes of the regression lines in height and diameter strongly indicate that trees perform better in more recent years, when their inhibition stage ended, they were not senescent and still had good potential to continue growing. Increased diameter and height growth rates in recent years could be explained by silvicultural treatments and atmospheric CO₂ uptake (Brienen et al., 2020; Olivar et al., 2013), but further long-term studies are needed to understand the underlying mechanisms. Furthermore, Vidal et al. (2016) showed that tree dimensions increase in managed areas, with properly applied silvicultural practices. Felling intensity and post-harvest silvicultural treatments also influence the recovery time of wood stocks (Castro et al., 2021). The main limitation of the analysis could lay in the representativeness of the sample. However, the forest managers of the place were consulted, to try to compensate for such representativeness of the sample, confirming that our results are in accordance with field observations. At the same time, these interviews were helpful in verifying that other elements of the forest were in good condition (Picard et al., 2012).

y la pendiente para la séptima década valida esta mejora. Estos hechos indican posibles mejoras en las condiciones de crecimiento de las alturas a causa de tratamientos silvícolas y a la absorción de carbono atmosférico (Brienen et al., 2020; Olivar et al., 2013); sin embargo, el aumento de las tasas de crecimiento puede acortar la vida útil de los árboles o aumentar la tasa de mortalidad de los árboles de dosel, por lo que debe realizarse un seguimiento forestal a largo plazo (Brienen et al., 2020). En cuanto al Grupo 4, incluso con baja disponibilidad de luz, las pendientes positivas muestran condiciones adecuadas para los árboles que han surgido últimamente.

Resulta relevante el análisis de las tendencias de crecimiento del diámetro de árboles de la misma edad, establecidos en años diferentes, ya que el diámetro es una de las dos variables que determinan cuánta madera se puede extraer del bosque (Santiago-García et al., 2017). En las Figuras 4B, 4C, 4E, y 4F se observa el rendimiento sostenido de la madera, debido a las pendientes positivas, casi todas estadísticamente significativas. Estos árboles de gran tamaño de los Grupos 1 y 2 muestran mejores condiciones porque comparten características silvícolas y genéticas similares, basadas en la agrupación de árboles; sin embargo, en los árboles más pequeños, el crecimiento del diámetro se ve más afectado que la altura y tienen mayor competencia (Olivar et al., 2013). El grupo con mayor número de árboles (Grupo 3) también mostró un rendimiento sostenido según el criterio sugerido.

Las mayores pendientes para alturas y diámetros de los árboles más grandes en los Grupos 1 y 2 (Figura 4) explican las diferentes condiciones entre estos grupos y las del Grupo 3. Este patrón ocurre posiblemente porque la altura dominante es la menos afectada por los cambios en la densidad, resultantes por tratamientos silvícolas intermedios como los aclareos (Olivar et al., 2013; Santiago-García et al., 2017). Como Olivar et al. (2013) indican, el aclareo de árboles seleccionados aumenta el espacio de crecimiento disponible para los individuos restantes que serán aprovechados posteriormente. Los individuos del Grupo 1 fueron los primeros en aprovechar la eliminación de los demás; tras la corta de los individuos más altos, los árboles del Grupo 2, segundos en tamaño, empezaron a tener esta ventaja y, por tanto, sus pendientes siguieron creciendo.

Modelos para alturas y diámetros independientemente de los grupos de tamaño de los árboles

Los resultados de los modelos que consideran todos los árboles en su conjunto corroboran lo constatado para la altura y el diámetro dentro de los grupos de tamaño. La media general estimada (intercepto) tanto de la altura como del diámetro aumenta a medida que la edad

Concluding remarks

Forests are large bodies and important carbon sinks, subjected to climate change, that function as big laboratories, where their outputs can be observed and assess if they agree with expectations (Köhl et al., 2015). Due to correlations among relevant elements of climate and growth dimensions, changes in the timber yield could evidence variations in particular biotic or abiotic features (Clark et al., 2010; Toledo et al., 2010). Therefore, improvements in growth dimensions, as in the case study here, could be signs of improvement in carbon sequestration.

The suggested procedure to look for keeping the timber yield monitors forest changes and can promote timely action if historical averages for diameter or height decrease and it tracks the surrounding key attributes and processes using dimensions crucial to wood yield from stem analysis. In fact, tree-ring analysis allows empirical estimation of tree growth patterns throughout their lifespan (Köhl et al., 2017; Nehrbass-Ahles et al., 2014). As long as species have rings, the procedure recommended here can be used to assess the level of sustainability of timber production and related attributes.

This proposal monitors the heights and diameters that trees reach throughout time. As such, if one of these dimensions decreases, it would imply that productivity and several forest biophysical processes could be in danger. This scenario would suggest that some silvicultural practices need correction. For example, for timber yield it should: (i) be established a minimum diameter of logging so that the impact on the stand structure is minimal, (ii) harvest timber species in proportion to their relative abundance to protect long-term composition, and (iii) ensure regeneration, through natural processes or silvicultural techniques (Mayaka et al., 2014). In general, monitoring of timber yield sustainability helps to maintain or extent forest resources, could prevent the loss of biological diversity, enforces forest health and vitality, and enables forests to function as protective, productive, and socio-economic actors (Jalilova et al., 2012; Larrubia et al., 2017).

Conclusions

The proposed procedure provides a means to assess the long-term timber yield sustainability, under changing conditions in biotic, abiotic, and anthropic factors, which influence the major tree dimensions. It would be desirable to do such a forest analysis periodically to assess whether timber yields have been sustained. In the forest studied, two scenarios can be identified: before 1956, a forest with extremely long-lived trees, which somehow hinder the renewal; and after 1956, when cutting began, there was greater availability of

incrementa, y las pendientes positivas de las líneas de regresión muestran que los árboles establecidos más recientemente crecen más en promedio (Figura 6). Los árboles de 10-20 años crecieron aproximadamente tres veces más que aquéllos de 20-30 años, y así sucesivamente (Figura 6A).

Las pruebas confirman que el rendimiento maderable se ha mantenido. Las pendientes positivas de las líneas de regresión en altura y diámetro indican claramente que los árboles rindieron más en los años recientes, cuando su etapa de inhibición terminó, no fueron senescentes y aún tuvieron mucho potencial para seguir creciendo. El aumento de las tasas de crecimiento en diámetro y altura en los últimos años podría explicarse por los tratamientos silvícolas y la absorción de CO₂ atmosférico (Brienen et al., 2020; Olivar et al., 2013), pero se necesitan más estudios a largo plazo para comprender los mecanismos subyacentes. Además, Vidal et al. (2016) demostraron que las dimensiones de los árboles aumentan en las zonas con manejo, con prácticas silvícolas aplicadas correctamente. La intensidad de corta y los tratamientos silvícolas posteriores a la tala también influyen en el tiempo de recuperación de las existencias de madera (Castro et al., 2021). La principal limitación del análisis podría residir en la representatividad de la muestra; no obstante, se consultó a los gestores forestales del lugar, para intentar compensar dicha representatividad, confirmando que los resultados concuerdan con las observaciones de campo. Al mismo tiempo, estas entrevistas fueron útiles para verificar que otros elementos del bosque se encontraban en buen estado (Picard et al., 2012).

Observaciones finales

Los bosques son grandes masas e importantes sumideros de carbono sometidos al cambio climático, que funcionan como grandes laboratorios, donde se pueden observar sus rendimientos y evaluar si concuerdan con las expectativas (Köhl et al., 2015). Debido a las correlaciones entre elementos relevantes del clima y las dimensiones del crecimiento, los cambios en el rendimiento maderable podrían evidenciar variaciones en características bióticas o abióticas particulares (Clark et al., 2010; Toledo et al., 2010). Por lo tanto, las mejoras en las dimensiones de crecimiento, como ocurre en este caso de estudio, podrían ser indicios de una mejora en el secuestro de carbono.

El procedimiento sugerido para buscar el mantenimiento del rendimiento maderable da seguimiento a los cambios forestales, puede promover la adopción de medidas oportunas si disminuyen los promedios históricos de diámetro o altura y realiza un seguimiento de los atributos y procesos clave circundantes utilizando dimensiones cruciales para el rendimiento maderable a partir de análisis troncales. De hecho, el análisis de los anillos de los árboles permite estimar empíricamente los

light and the forest was left with medium-sized trees. The extraction carried out with forest management favored the increase in diameter and height growth over time for the largest groups of trees, and the stability of such growth in the other groups. These dimensional increases showed that the timber yield has been sustained. It is important to highlight that the longer the study period, as well as a bigger forest area extension, the more reliable the results will be.

Acknowledgments

We are grateful for the field information provided by forest managers Ing. Saúl Benjamín Monreal Rangel and Ing. Jesús Victoriano Hernández Pérez, and the Unión de Comunidades Productoras Forestales Zapotecos-Chinantecos de la Sierra Juárez, on the evolution of forest management and ecology in the study area, as well as the social impact in recent decades. We would also like to thank the Fulbright scholar Susan Gonzalez for her help in revising the final text.

End of English version

References / Referencias

- Anderson-Teixeira, K. J., Miller, A. D., Mohan, J. E., Hudiburg, T. W., Duval, B. D., & DeLucia, E. H. (2013). Altered dynamics of forest recovery under a changing climate. *Global Change Biology*, 19(7), 2001–2021. <https://doi.org/10.1111/gcb.12194>
- Baycheva-Merger, T., & Wolfslehner, B. (2016). Evaluating the implementation of the Pan-European criteria and indicators for sustainable forest management – A SWOT analysis. *Ecological Indicators*, 60, 1192–1199. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.009>
- Brienen, R. J. W., Caldwell, L., Duchesne, L., Voelker, S., Barichivich, J., Baliva, M., Ceccantini, G., Di Filippo, A., Helama, S., Locosselli, G. M., Lopez, L., Piovesan, G., Schöngart, J., Villalba, R., & Gloor, E. (2020). Forest carbon sink neutralized by pervasive growth-lifespan trade-offs. *Nature Communications*, 11, 4241. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17966-z>
- Castro, T. da C., Carvalho, J. O. P., Schwartz, G., Silva, J. N. M., Ruschel, A. R., Freitas, L. J. M., Gomes, J. M., & Pinto, R. de S. (2021). The continuous timber production over cutting cycles in the Brazilian Amazon depends on volumes of species not harvested in previous cuts. *Forest Ecology and Management*, 490(2021), 119124. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119124>
- Clark, D. B., Clark, D.A., & Oberbauer, S. F. (2010). Annual wood production in a tropical rainforest in NE Costa Rica linked to climatic variation but not to increasing CO₂. *Global Change Biology*, 16(2), 747–759. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02004.x>
- Dauber, E., Fredericksen, T. S., & Peña, M. (2005). Sustainability of timber harvesting in Bolivian tropical forests. *Forest*
- patrones de crecimiento de los árboles a lo largo de su vida útil (Köhl et al., 2017; Nehrbass-Ahles et al., 2014). Siempre que las especies tengan anillos, el procedimiento aquí recomendado puede utilizarse para evaluar el nivel de sostenibilidad de la producción maderable y los atributos relacionados.
- Esta propuesta da seguimiento a las alturas y los diámetros que los árboles alcanzan a lo largo del tiempo. Así, si una de estas dimensiones disminuye, se supondría que la productividad y varios procesos biofísicos forestales podrían estar en peligro. Este escenario sugeriría la necesidad de corregir algunas prácticas silvícolas. Por ejemplo, para el rendimiento maderable debería (i) establecerse un diámetro mínimo de corta para que el impacto en la estructura del rodal sea mínimo, (ii) aprovechar las especies maderables en proporción a su abundancia relativa para proteger la composición a largo plazo, y (iii) asegurar la regeneración mediante procesos naturales o técnicas silvícolas (Mayaka et al., 2014). En general, el seguimiento de la sostenibilidad del rendimiento maderable ayuda a mantener o ampliar los recursos forestales, podría evitar la pérdida de diversidad biológica, refuerza la salud y la vitalidad de los bosques y permite que éstos funcionen como agentes protectores, productivos y socioeconómicos (Jalilova et al., 2012; Larrubia et al., 2017).

Conclusiones

El procedimiento propuesto proporciona un medio para evaluar la sostenibilidad del rendimiento maderable a largo plazo, en condiciones cambiantes de los factores bióticos, abióticos y antrópicos que afectan las principales dimensiones de los árboles. Sería aconsejable realizar, periódicamente, un análisis forestal de este tipo para evaluar si los rendimientos maderables se han sostenido. En el bosque estudiado se pueden identificar dos escenarios: antes de 1956, un bosque con árboles extremadamente longevos que de alguna manera dificultan la renovación; y después de 1956, cuando se inició la corta, hubo mayor disponibilidad de luz y el bosque quedó con árboles de tamaño medio. La extracción con manejo forestal favoreció el aumento del crecimiento en diámetro y altura a lo largo del tiempo para los grupos de árboles más grandes, y la estabilidad de dicho crecimiento en los demás grupos. Estos aumentos dimensionales mostraron que el rendimiento maderable se ha sostenido. Es importante destacar que cuanto mayor sea el periodo de estudio, así como la extensión de la superficie forestal, más fiables serán los resultados.

Agradecimientos

Agradecemos la información de campo brindada por los administradores forestales Ing. Saúl Benjamín Monreal Rangel e Ing. Jesús Victoriano Hernández Pérez, y

- Ecology and Management*, 214(1-3), 294–304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.04.019>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *Global forest resources assessment 2020: Main report*. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- Hahn, W. A., & Knoke, T. (2010). Sustainable development and sustainable forestry: analogies, differences, and the role of flexibility. *European Journal of Forest Research*, 129(5), 787–801. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0385-0>
- Irland, L. I. (2010). Assessing sustainability for global forests: a proposed pathway to fill critical data gaps. *European Journal of Forest Research*, 129(5), 777–786. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0285-3>
- Jalilova, G., Khadka, C., & Vacik, H. (2012). Developing criteria and indicators for evaluating sustainable forest management: A case study in Kyrgyzstan. *Forest Policy and Economics*, 21, 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.01.010>
- Köhl, M., Lasco, R., Cifuentes, M., Jonsson, O., Korhonen, K. T., Mundhenk, P., Navar, J. J., & Stinson, G. (2015). Changes in forest production, biomass and carbon: Results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment. *Forest Ecology and Management*, 352, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.036>
- Köhl, M., Neupane, P. R., & Lotfiomra, N. (2017). The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A retrospective analysis using tree ring data of three tropical tree species grown in natural forests of Suriname. *PLoS ONE*, 12(8), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181187>
- Larrubia, C. J., Kane, K. R., Wolfslehner, B., Guldin, R., Rametsteiner, E. (2017). Using criteria and indicators for sustainable forest management: A way to strengthen results-based management. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/3/i6883e/i6883e.pdf>
- Mayaka, T. B., Eba'a-Atyi, R., & Nkie, M. C. (2014). On volume recovery index and implications for sustainable logging in Congo Basin. *Forest Ecology and Management*, 313, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.11.013>
- Nehrbass-Ahles, C., Babst, F., Klesse, S., Nötzli, M., Bouriaud, O., Neukom, R., Dobbertin, M., & Frank, D. (2014). The influence of sampling design on tree-ring based quantification of forest growth. *Global Change Biology*, 20(9), 2867–2885. <https://doi.org/10.1111/gcb.12599>
- Olivar, J., Bogino, S., Rathgeber, C., Bonnesoeur, V., & Bravo, F. (2013). Thinning has a positive effect on growth dynamics and growth–climate relationships in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees of different crown classes. *Annals of Forest Science*, 71(3), 395–404. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0348-y>
- Picard, N., Gourlet-Fleury, S., & Forni, E. (2012). Stock recovery rates are not the panacea to assess timber yield sustainability: evidence from managed Central African forests. *Forest Ecology and Management*, 281, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.013>
- por la Unión de Comunidades Productoras Forestales Zapotecos-Chinantecos de la Sierra Juárez, sobre la evolución del manejo forestal y ecología en el área de estudio, así como del impacto social en las últimas décadas. También nos gustaría agradecer a la becaria Fulbright Susan González por su ayuda en la revisión del texto final.

Fin de la versión en español

- Piponiot, C., Derroire, G., Descroix, L., Mazzei, L., Rutishauser, E., Sist, P., & Hérault, B. (2018). Assessing timber volume recovery after disturbance in tropical forests – A new modelling framework. *Ecological Modelling*, 384, 353–369. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.05.023>
- R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing* [software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Robson, J. P. (2009). Out-migration and commons management: social and ecological change in a high biodiversity region of Oaxaca, Mexico. *International Journal of Biodiversity Science & Management*, 5(1), 21–34. <https://doi.org/10.1080/17451590902775137>
- Roldán-Félix, E. (2014). *Experiencias comunitarias de manejo forestal en bosques templados. Unión de Comunidades Productoras Forestales Zapotecos-Chinantecos de la Sierra Juárez*. https://coin.fao.org/coin-static/cms/media/21/14128881270500/3_eusebio_roldan_pres_uzachi_sem_intern_mfs_2014.pdf
- Santiago-García, W., Pérez-López, E., Quiñonez-Barraza, G., Rodríguez-Ortiz, G., Santiago-García, E., Ruiz-Aquino, F., & Tamarit-Urías, J. C. (2017). A dynamic system of growth and yield equations for *Pinus patula*. *Forests*, 8(12), 465. <https://doi.org/10.3390/f81204>
- Tidwell, T. L. (2016). Nexus between food, energy, water, and forest ecosystems in the USA. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 6, 214–224. <https://doi.org/10.1007/s13412-016-0367-8>
- Toledo, M., Poorter, L., Peña-Claros, M., Alarcón, A., Balcázar, J., Leaño, C., Licona, J. C., Llanque, O., Vroomans, V., Zuidema, P., & Bongers, F. (2010). Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. *Journal of Ecology*, 99(1), 254–264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01741.x>
- Torres-Rojas, J. M., Moreno-Sánchez, R., & Mendoza-Briseño, M. A. (2016). Sustainable forest management in Mexico. *Current Forestry Reports*, 2(2), 93–105. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0033-0>
- Vidal, E., West, T. A. P., & Putz, F. E. (2016). Recovery of biomass and merchantable timber volumes twenty years after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. *Forest Ecology and Management*, 376(2016), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.003>

Appendix 1

Example of ANOVA of a simple regression. The ANOVA and the joint test are presented, as well as the tests on the individual parameters.

The simple regression model for height of same-aged *Pinus patula* trees is $h_{\delta j} = a_{\delta} + b_{\delta}y_{\delta j} + e_{\delta j}$. As an example, the fitted equation for height at 40 years old trees of Group 2 is $\hat{h}_{40j} = -418.346 + 0.2043y_{40j}$. The corresponding ANOVA is:

Apéndice 1

Ejemplo de análisis de varianza de una regresión simple. Se muestran el análisis de varianza y la prueba conjunta, así como las pruebas de los parámetros individuales.

El modelo de regresión simple para la altura de árboles de la misma edad de *Pinus patula* es $h_{\delta j} = a_{\delta} + b_{\delta}y_{\delta j} + e_{\delta j}$. Como ejemplo, la ecuación ajustada para la altura en árboles de 40 años del Grupo 2 es $\hat{h}_{40j} = -418.346 + 0.2043y_{40j}$. El análisis de varianza correspondiente es:

Analysis of variance / Análisis de varianza

	Df/GL	Sum Sq/ Suma de cuadrados	Mean Sq/ Media cuadrática	F Value/ Valor F	Pr(>F)/ Pr(>F)
Model/Modelo	1	124.892	124.892	56.717	1.16E-05
Residuals/Residuos	11	24.222	2.202		
Corrected Total/ Total Corregido	12	149.114			

Residual standard error: 1.484 on 11 degrees of freedom (Df); Coef. var: 6.33734; Multiple R-squared: 0.8376; Adjusted R-squared: 0.8228.

Error estándar residual: 1.484 con 11 grados de libertad (GL); Coeficiente de variación: 6.33734; Coeficiente de determinación: 0.8376; R² ajustado: 0.8228.

Parameter estimates / Estimación de parámetros

	Df/GL	Estimate/ Estimación	Std. Error/ Error estándar	t value/ Valor t	Pr(> t)
(Intercept)/ (Intercepto)	1	-418.346	58.660	-7.132	1.91E-05
Year/Año	1	0.204	0.029	7.531	1.15E-05

Appendix 2

Example of ANOVA of a multiple regression. The ANOVA and the joint test are presented, as well as the tests on the individual parameters.

The model for height on all the *Pinus patula* trees is $h_{\delta j} = a_h + b_h \frac{1}{\delta} + c_h y_{\delta j} + e_{\delta j}$. The fitted equation resulted from this analysis is $\hat{h}_{\delta j} = -114.81 - \frac{210.91}{\delta} + 0.071 y_{\delta j}$. Both the test on the individual parameters with the t-statistic and the joint test of the model with the F-statistic were highly significant.

Apéndice 2

Ejemplo de análisis de varianza de una regresión múltiple. Se muestran el análisis de varianza y la prueba conjunta, así como las pruebas de los parámetros individuales.

El modelo para la altura de todos los árboles de *Pinus patula* es $h_{\delta j} = a_h + b_h \frac{1}{\delta} + c_h y_{\delta j} + e_{\delta j}$. La ecuación ajustada resultante de este análisis es $\hat{h}_{\delta j} = -114.81 - \frac{210.91}{\delta} + 0.071 y_{\delta j}$. Tanto la prueba de los parámetros individuales con el estadístico t como la prueba conjunta del modelo con el estadístico F resultaron altamente significativas.

Analysis of variance / Análisis de varianza

	Df/GL	Sum Sq/ Suma de cuadrados	Mean Sq/ Media cuadrática	F Value/ Valor F	Pr(>F)/ Pr(>F)
Model/Modelo	2	30 447.8	15 223.9	792.9	<2.2E-16
Residuals/Residuos	584	11 212.0	19.2		
Corrected Total/ Total Corregido	586				

Residual standard error: 4.382 on 584 degrees of freedom (Df); Coef. var: 25.785; Multiple R-squared: 0.7309; Adjusted R-squared: 0.7299.
Error estándar residual: 4.382 con 584 grados de libertad (GL); Coeficiente de variación: 25.785; Coeficiente de determinación: 0.7309; R² ajustado: 0.7299.

Parameter estimates / Estimación de parámetros

	Df/GL	Estimate/ Estimación	Std. Error/ Error estándar	t value/ Valor t	Pr(> t)
(Intercept)/ (Intercepto)	1	-114.81	22.33	-5.14	3.72E-07
Year/Año	1	0.07	0.01	6.35	4.44E-10
1/Edad	1	-210.91	8.22	-25.67	< 2e-16