

**III ENCUESTRO CIENTÍFICO NACIONAL  
DE  
EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020**

**Título:** Manejo y utilización sustentable de la biomasa forestal en Pinar del Río, Cuba

**Temática a la que tributa el trabajo:** IV Gestión ambiental desde iniciativas o proyectos

**Autores:** M. Sc. Reinaldo Valdés Reinoso; Dr. C. Daniel Álvarez Lazo; Dr. C. Mariel Guera

**Dirección de correo electrónico:** [daniel@upr.edu.cu](mailto:daniel@upr.edu.cu); [cubamayca@gmail.com](mailto:cubamayca@gmail.com)

**Entidad laboral de procedencia:** Universidad de Pinar del Río, Cuba

### **Resumen**

El objetivo del presente trabajo está relacionado con la utilización de la modelación matemática como herramienta para el auxilio en las decisiones durante el manejo y aprovechamiento de la madera de *Pinus caribaea* Morelet en la Empresa Agro Forestal Macurije, en Pinar del Río, Cuba, durante el período 2015-2019. Se emplean diferentes procedimientos entre los que se destacan la estadística aplicada, modelos de programación matemática, el cálculo diferencial, la geometría descriptiva la modelación matemática; así como la teoría de corte de la madera. Entre los resultados más significativos podemos destacar que los turnos técnicamente óptimos variaron entre 31 años y 35 años, según la calidad del sitio. El análisis multifactorial posibilita exponer que el sistema de aprovechamiento de troncos enteros resultó ser más rentable que el de madera corta. El modelo de programación por metas lexicográficas es una herramienta eficiente en el auxilio de la planificación de las actividades de extracción y transporte de la madera. En correspondencia con sus propiedades de trabajabilidad, radio de curvatura de la madera, así de sus propiedades de encolado, el pino constituye una materia prima idónea para la producción de muebles de diversos tipos, posibilitando el aumento del valor agregado de esta materia prima. Los procedimientos desarrollados en el presente trabajo han sido introducidos en diferentes escenarios productivos de Angola, Cuba, Brasil, Mozambique y el Congo, así como en la docencia de postgrado en los programas en Ciencias Forestales.

**Palabras Claves:** pino, madera, procesamiento, utilización, optimización

### **Abstract**

The objective of this work is related to the use of mathematical modeling as a tool to aid in decisions during the management and use of *Pinus caribaea* Morelet wood in the Macurije Agroforest Company, in Pinar del Río, Cuba, during the period 2015-2019. Different procedures are used, as the applied statistician, mathematical programming models, differential calculus, descriptive geometry, mathematical modeling; as well as the theory of cutting the wood. Between the most significant results, we can highlight that the technically optimal shifts varied between 31 years and 35 years, depending on the quality of the site. The multifactorial analysis makes it possible to show that the whole log harvesting system turned out to be more profitable than the short wood one.



### III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

The programming model for lexicographic goals is an efficient tool to aid in planning activities for the extraction and transport of wood. In correspondence with its workability properties, wood's curvature radius, as well as its gluing properties, pine constitutes an ideal raw material for the production of various types of furniture, making it possible to increase the added value of this raw material. The procedures developed in this work have been introduced in different production settings in Angola, Cuba, Brazil, Mozambique and the Congo, as well as in postgraduate teaching in Forest Sciences programs.

**Key words:** pine, wood, processing, utilization, optimization

#### Introducción

Frente a estos desafíos contemporáneos y objetivando una mejor rentabilidad, la industria forestal se preocupa con una serie de toma de decisiones relacionadas con las prácticas silviculturales, el corte, transporte, almacenamiento y la selección óptima de los métodos de transformación primaria de las trozas en las instalaciones industriales; a partir de métodos estadísticos y métodos de programación matemática como son la programación lineal y la programación dinámica (Vanzetti et al., 2018).

Los modelos monocriterios de programación lineal, a pesar de su gran utilidad, robustez y popularidad, han dado resultados alejados de la realidad (Aldea et al., 2014); así las técnicas de análisis de decisión multicriterio, principalmente los modelos de programación por metas se tornan las técnicas alternativas más utilizadas para el auxilio en la toma de decisiones en la gestión forestal (Broz et al., 2016). De las variantes de estas técnicas, las más utilizadas en la gestión forestal son: la programación por metas ponderadas y la programación por metas lexicográficas.

Por otra parte debemos establecer que las características univariadas o monocriterio de las herramientas (modelos) que auxilian las tomas de decisiones en las diferentes etapas del proceso productivo en las empresas forestales en general y en la Empresa Agroforestal Macurije en particular, pueden ser responsables por las discrepancias existentes entre los resultados esperados y la realidad observada después de la toma de determinadas decisiones o selección de determinadas alternativas, erróneamente consideradas más adecuadas al considerar apenas una única variable o criterio.

Por lo que a partir de los elementos antes expuestos el objetivo general del presente trabajo está relacionado con construcción de modelos matemáticos multivariados que posibiliten la optimización del aprovechamiento del *Pinus caribaea Morelet var. caribaea Barret* y *Golfari* en la Empresa Agroforestal Macurije

#### Desarrollo

El trabajo se desarrolla en diferentes dependencias de la Empresa Agroforestal Macurije está ubicada en la región más occidental de la provincia de Pinar del Río, abarcando partes de los territorios de los municipios Guane y Mantua.



### III ENCUESTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

Sus límites geográficos son los siguientes: al Noreste con el municipio Minas de Matahambre (Empresa Agro Forestal Minas de Matahambre) y con el litoral costero desde la Ensenada de Baja hasta la Ensenada de Garnacha; al Este con el municipio San Juan y Martínez (Empresa Agro Forestal Pinar del Río); al Sur con el municipio Sandino (Empresa Agro Forestal Guanahacabibes) y al Sureste con el litoral del Golfo de México comprendido entre las desembocaduras de los ríos Cuyaguaje y Puercos. Las plantaciones analizadas pertenecen a la Unidad Básica de Producción Forestal (UBPF) "Las Cañas" perteneciente a la unidad silvícola (US) Mantua de la Empresa Forestal Macurije.

#### **Modelos matemáticos para la determinación del turno óptimo en plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barrett y *Golfari* con diferentes índices de sitio**

Una de las cuestiones fundamentales en la economía forestal es la determinación del turno óptimo de una plantación forestal (Posavec et al., 2012) y este problema ha captado la atención de gestores forestales a lo largo de los últimos años (Guera et al., 2020).

Ante el expuesto y bajo la hipótesis de que los turnos bicriterio (criterios volumétricos de máxima productividad y criterios económicos) serían más realistas y prácticos en la gestión de plantaciones forestales, se proponen alternativas de determinación de turnos técnicos a través del uso de métodos de programación por metas ponderadas en plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barrett y *Golfari* de la Empresa Forestal Integral (EFI) Macurije, Pinar del Río, Cuba.

La base de datos utilizada para la modelación fue constituida por 550 parcelas temporales de 500 m<sup>2</sup> (r = 12,615 m) levantadas en áreas de la EFI Macurije, siguiendo un muestreo completamente aleatorio.

El análisis de la suficiencia muestral fue realizado para la variable volumen (m<sup>3</sup>/ha) por medio del cálculo del error de muestreo (*EEMM*) que deberá ser inferior al error admisible de 10%, a un nivel de probabilidad de 95%, para que la muestra piloto de 550 parcelas sea considerada suficiente para la realización de las estimaciones.

#### **Turno técnicamente óptimo (TTO)**

Por el método gráfico se obtuvieron turnos técnicamente óptimos (Figura 1). Los resultados indican TTO comprendidos entre 31 años y 35 años, en dependencia del índice de sitio; coincidiendo con Guera et al., (2019); al exponer que la calidad del sitio presenta una significativa influencia sobre el turno de corta técnico.



### III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

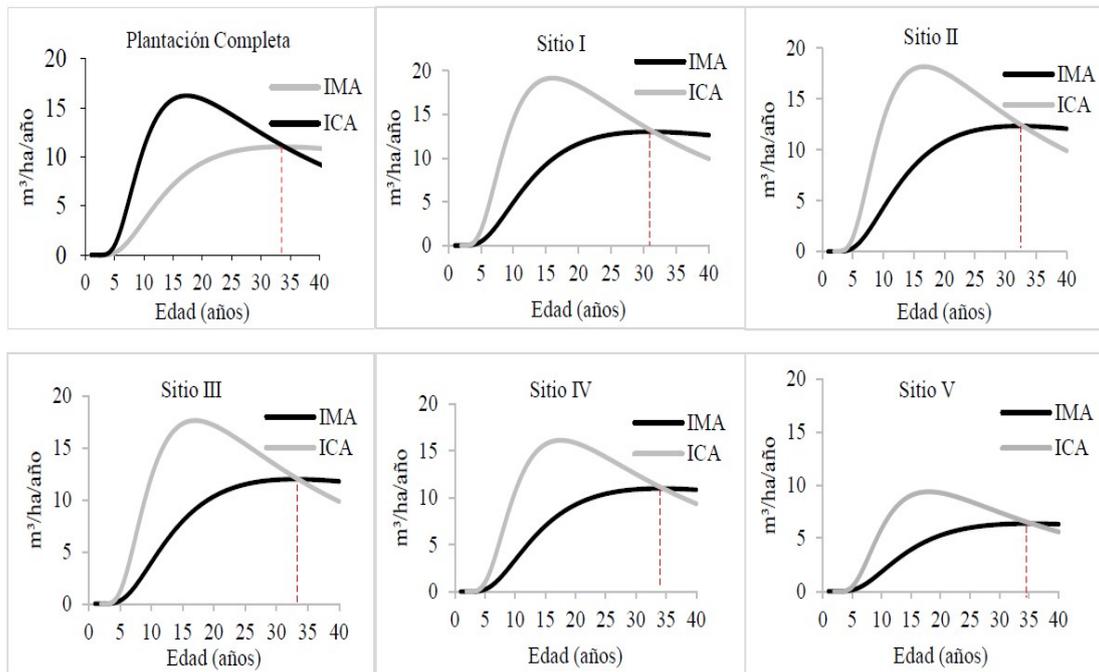


Figura 1. Edad de Rotación Técnica (ERT) por índice de sitio para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.

Resultados similares al utilizar la modelación de programación por metas ponderadas que definen el turno de corta entre 31 y 35 años, lo cual favorece la estabilidad y conservación de las plantaciones y la captura de carbono; tal y como se expone a continuación.

#### Modelos de programación por metas ponderadas para la determinación de los turnos técnicos del *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* Barret y Golfari

La función objetivo (Ec.1), se corresponde con un modelo de programación de metas ponderadas (PMP) sujeta a restricciones (Ec.2, Ec.3, Ec.4, Ec.5), que representan las metas y sus variables de desvío.

La inclusión de las variables de desvío convierte esas restricciones en “restricciones blandas” (Ec.2), que confieren a esos modelos una flexibilidad ausente en los modelos de programación lineal.

Las restricciones duras (Ec.3, Ec.4), representan la condición binaria de las variables de decisión y la Ec. (5), representa la restricción de ocasión única de corte por calidad de sitio en el período considerado.

$$\text{Min} \left[ \sum_m \frac{w_{mss}}{t_{mss}} h_m(n_{1s}; n_{2s}) \right] \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\text{Meta}_1: \sum_s \text{IMA}_{IS} * X_{IS} + n_{1s} - p_{1s} = T_{1s} ; i = 1, \dots, l; s = 1, \dots, S \quad (2)$$



**III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL  
DE  
EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020**

$$X_{IS} \geq 0i = 1, \dots, I \quad ; \quad s = 1, \dots, S \quad (3)$$

$$X_{IS} \leq 1i = 1, \dots, I \quad ; \quad s = 1, \dots, S \quad (4)$$

$$\sum_i X_{IS} = 1, \dots, I \quad ; \quad s = 1, \dots, S \quad (5)$$

Como se puede apreciar en la Tabla 1, las edades de rotación determinadas para el criterio técnico, exponen resultados similares a los obtenidos a partir de los enfoques analíticos y gráficos generalmente utilizados

Tabla 1. Turnos técnicamente óptimos de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.

Sitios	CRITERIOS	
	IMA	
	Valor	Turno técnicamente óptimo
PT	11,05	34
I	13,01	31
II	12,35	32
III	12,00	33
IV	10,96	34
V	6,37	35

La clave del éxito del uso de los modelos de programación por metas está en la determinación de los niveles de aspiraciones alcanzables. Con el fin de alcanzar soluciones viables, los niveles de aspiraciones fueron bajados a IMA = 12 m<sup>3</sup>/ha/año. Obteniendo una gran versatilidad del modelo, pues el mismo permitió una mejor manipulación de las ponderaciones o pesos a ser atribuidas a cada una de las metas y así simular y determinar los turnos óptimos en las diferentes calidades de sitio.

**Enfoque multivariado en experimentos de extracción de madera en plantaciones forestales de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barrett y Golfari**

El aprovechamiento forestal es la actividad más costosa del proceso productivo forestal. En esta actividad, la extracción y el transporte de la madera representan más de 50% de los costos de la madera puesta en la industria (Machado, 2014). Esta alta participación en los costos de producción lleva a las empresas forestales a buscar continuamente alternativas para minimizar los costos de extracción y transporte de madera. Las empresas forestales cubanas no son una excepción y lo anterior refleja de



### III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

forma fidedigna sus condiciones productivas, principalmente las de la Empresa Agroforestal Macurije.

Debido a la cantidad de factores que afectan la extracción de madera, es necesario realizar estudios de las características técnico-económicas de la maquinaria de extracción en las condiciones en las cuales serán utilizadas.

Con base en lo anterior y suponiendo que una evaluación basada simultáneamente en el costo unitario y en la productividad proporcionaría resultados más equilibrados para toma de decisiones menos subjetivas es necesario evaluar técnica y económicamente, basándose simultáneamente en los criterios "costo unitario" y "productividad"; el desempeño de los equipos de extracción de madera en plantaciones de *Pinus caribaea Morelet var. caribaea Barret y Golfari* en diferentes escenarios en la Empresa Agroforestal Macurije, Pinar del Río, Cuba; a partir de la utilización de técnicas multivariadas, como se exponen a continuación.

#### **A) Datos experimentales e indicadores de desempeño de las máquinas y equipos de extracción de madera en la Empresa Agroforestal Macurije**

Se evaluaron los sistemas de madera corta (3 m o 4 m) y de tronco entero (12 m). Los indicadores de desempeño o criterios de evaluación utilizados fueron los costos unitarios (USD/m<sup>3</sup>) y las productividades (metro cúbico por hora trabajada, m<sup>3</sup>/h) y costo de explotación de las maquinarias, calculadas según la metodología propuesta por Guera et al., (2020).

#### **Productividades y costos de explotación de madera en la Empresa Agroforestal Macurije**

Los costos de explotación indicaron, como podría esperarse, que la menos onerosa fue la yunta de bueyes con solo 1.34 USD/h, pero también fue la que presentó la menor productividad por hora trabajada (3.95 m<sup>3</sup>/h). El tractor chino fue el más costoso con un costo operacional de 29.55 USD/h y una productividad intermedia de 15.98 m<sup>3</sup>/h. A diferencia de la yunta de bueyes en la que el componente principal de los costos fue el de mano de obra, en ambos *skidders*, los componentes principales fueron los costos operacionales (costos variables).

Los resultados de los costos y productividades indican que el *Skidder* John Deere es la mejor alternativa para la extracción semi mecanizada de la madera por tener la mayor productividad (17.20 m<sup>3</sup>/h) y el menor costo unitario (1.02 USD/m<sup>3</sup>) de los dos *skidders*.

La yunta de bueyes presentó costos muy menores a los de los *skidders* y por ende es la opción más rentable. Sin embargo, su baja productividad hace impracticable su uso exclusivo ya que, para asegurar el abasto continuo de madera en las unidades de transformación primaria, eso implicaría aumentar significativamente su cantidad para compensar esa baja productividad.

Sería una alternativa viable para la extracción de madera en pendientes altas y/o en regímenes de producción lenta (cuando no hay limitación de tiempo para cumplir con los planes de producción).



### III ENCUESTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

Las diferencias multivariadas (significancia desde los puntos de vista económico y productivo) encontradas entre los sistemas de aprovechamiento (factor S) se atribuyen a los menores costos del sistema de troncos enteros, considerado más viables.

Para la variable dependiente productividad, la prueba de Tukey aplicada a la única interacción significativa (M×P) permitió notar que, en todas y cada una de las clases de pendiente, existió diferencia significativa entre las productividades de las máquinas evaluadas, siendo la de mayor productividad el John Deere.

En cuanto al desempeño de cada una de las máquinas a lo largo de las pendientes, los *skidders* tuvieron un desempeño diferenciado, presentando una productividad mayor en la clase de menor pendiente.

#### **Experimento factorial multivariado para el conjunto "costo-productividad"**

De los resultados del enfoque multivariado, se deduce que, tanto la maquinaria utilizada en la extracción de la madera como el método de aprovechamiento utilizado y las pendientes en las que se extrae la madera, influyen significativamente en el vector de medias costo-productividad.

Las diferencias multivariadas (significancia desde los puntos de vista económico y productivo) encontradas entre los sistemas de aprovechamiento (factor S) se atribuyen a los menores costos del sistema de troncos enteros considerado más viable. El experimento multivariado siguió un diseño al azar en bloques con arreglo factorial en el esquema M×P×S (3 × 3 × 2). Los bloques fueron: rodales de 21 años (bloque I) (rotación adoptada en la Empresa Agroforestal Macurije) y rodales de 32 años (bloque II), con el propósito de controlar posibles efectos de la variación de la edad de rotación en las productividades y costos de extracción de madera.

Los niveles de los tres factores son: el factor M (Maquinaria) con tres niveles: 1) *skidder*J-80A, 2) *skidder* John Deere 548E, 3) yunta de bueyes; el factor P (Pendiente) con tres niveles: 1) P < 8%, 2) 8% ≤ P ≤ 16%, 3) 16% < P < 25% y el Factor S (método o sistema de aprovechamiento) con dos niveles: 1) troncos enteros de 12 m, 2) madera corta de 3 o 4 m.

El modelo matemático para el arreglo factorial multivariado 3 × 3 × 2 del diseño experimental en bloques (DCB) fue la expresión (8):

$$Y_{ijklr} = \mu_r + \alpha_{ir} + \beta_{jr} + \gamma_{kr} + (\alpha\beta)_{ijr} + (\alpha\gamma)_{ikr} + (\beta\gamma)_{jkr} + \delta_{ijklr} + b_{lkr} + e_{ijklr} \quad (6)$$

Dónde:  $Y_{ijklr}$ : valor observado de la r-ésima variable respuesta en el i-ésimo nivel del factor M, j-ésimo nivel del factor P, k-ésimo nivel del factor S, en el l-ésimo bloque;  $M_r$ : una constante (media general) de la r-ésima variable;  $\alpha_{ir}$ : efecto del i-ésimo nivel del factor M en la r-ésima variable;  $\beta_{jr}$ : efecto del j-ésimo nivel del factor P en la r-ésima variable;  $\gamma_{kr}$ : efecto del k-ésimo nivel del factor S en la r-ésima variable;  $(\alpha\beta)_{ijr}$ : efecto de la interacción entre M y P en la r-ésima variable;  $(\alpha\gamma)_{ikr}$ : efecto de la interacción entre M y S en la r-ésima variable;  $(\beta\gamma)_{jkr}$ : efecto de la interacción entre P y S en la r-ésima variable;  $\delta_{ijklr}$ : efecto de la interacción entre M, P y S en la r-ésima variable;  $b_{lkr}$ : efecto del bloque l en la r-ésima variable;  $e_{ijklr}$ : error aleatorio asociado.

El análisis de varianza del experimento factorial multivariado se realizó con el software SAS (SAS, 1999) que dispone de las pruebas de lambda de Wilks, traza de Pillai, traza



### III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

de Lawley-Hotelling y la Mayor Raíz de Roy para las comparaciones. En los casos de rechazo de las hipótesis nulas ( $p$ -valor  $< 0.05$ ), las comparaciones múltiples entre vectores de medias se realizaron con la prueba  $T^2$  de Hotelling, análogo multivariado de la prueba  $t$  de Student, testando la hipótesis nula,  $H_0: \mu_1 = \mu_2$ , siendo  $\mu_1$  y  $\mu_2$  los vectores de medias.

$$T^2 = (\bar{X} - \bar{Y})^T \left[ S \left( \frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y} \right) \right]^{-1} (\bar{X} - \bar{Y}) \quad (7)$$

$$S = \frac{(n_x - 1)S_x + (n_y - 1)S_y}{(n_x + 1) + (n_y - 1)} \quad (8)$$

Dónde:  $S_x$  y  $S_y$  matrices de covarianza de  $X$  y  $Y$ , respectivamente.  $\bar{X}$  y  $\bar{Y}$  representan las medias de  $X$  y  $Y$ .

Las significaciones se determinaron aproximando la Prueba  $T^2$  de Hotelling a la prueba  $F$  de la siguiente manera:

$$F = \frac{n-k}{k(n-1)} T^2 \sim F(k, n-k) \quad (9)$$

Dónde:  $n = n_x + n_y - 1 =$  grados de libertad;  $k$ -número de variables.

De acuerdo con los resultados de este, todos los factores y la interacción  $M \times P$  fueron significativos

De los resultados del enfoque multivariado, se deduce que, tanto la maquinaria utilizada en la extracción de la madera como el método de aprovechamiento utilizado y las pendientes en las que se extrae la madera, influyen significativamente en el vector de medias costo-productividad.

Las diferencias multivariadas (significancia desde los puntos de vista económico y productivo) encontradas entre los sistemas de aprovechamiento (factor  $S$ ) se atribuyen a los menores costos del sistema de troncos enteros considerado más viable. Estos resultados coinciden con los encontrados por Mousavi (2012), en rodales mixtos, cuyos resultados también indicaron mayor viabilidad del sistema de troncos enteros.

Se observó que apenas la interacción  $M \times P$  fue significativa y todas las interacciones que involucraron al factor  $S$  no fueron significativas. Esto indica que una óptima combinación de los factores  $M$  y  $P$  puede inhibir el efecto del factor  $S$  en el conjunto costo-productividad y los sistemas de aprovechamiento de tronco entero y madera corta podrán ser adoptados sin perjudicar la rentabilidad de la producción. Los resultados de la prueba  $T^2$  de Hotelling para vectores de medias en la interacción  $M \times P$  indicaron una alta influencia de esta en el conjunto costo-productividad.

Las significancias encontradas en las comparaciones por pares de vectores de medias, indicaron un efecto significativo simultáneo de la interacción  $M \times P$  en las productividades y los costos unitarios de extracción de madera. Se observó una diferencia significativa entre los desempeños (costo-productividad) del *skidderJ-80A* en las tres clases de pendiente. John Deere presentó desempeños similares en las dos primeras clases de pendientes ( $P1$  y  $P2$ ), siendo estos dos superiores al de la tercera clase ( $P3$ ). En cuanto



### III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

a las yuntas de bueyes, su desempeño en la primera clase de pendientes (P1) fue superior a los de las otras dos clases (P2 y P3) que no fueron diferentes entre ellas.

En resumen, podemos establecer que se evidenciaron la viabilidad y la utilidad del enfoque multivariado en la evaluación de la extracción de madera; es más viable extraer la madera con el sistema de tronco entero.

La interacción maquinaria-pendiente tuvo influencia significativa en la variación del conjunto costo-productividad. El *skidder* John Deere 548E, por presentar menor costo unitario y mayor productividad que el J-80A, es el recomendado para la extracción semimecanizada de la madera.

#### **Modelo de programación por metas lexicográfica para la planificación de la extracción y transporte de madera en la Empresa Agroforestal Macurije**

Con la hipótesis de que el abordaje multicriterio utilizado en un sistema ampliado que integra ambas actividades el objetivo del presente trabajo está relacionado con Proponer un modelo de programación por metas lexicográficas para el auxilio de la planificación de la Extracción y Transporte de madera en plantaciones de la Empresa Agroforestal Macurije

#### **Modelo de programación por Metas Lexicográficas de transbordo propuesto** **Especificaciones de los conjuntos, parámetros y variables de decisión**

##### **Conjuntos:**

I- Total de orígenes de transbordo (Rodales), J- Total de destinos de transbordos (unidades de transformación primaria); K- total de patios de almacenamiento, siendo la cantidad de patios proporcional al área del rodal; L- Sistema de aprovechamiento o formas (longitud) en que la madera es extraída y transportada (I = 1- troza corta; I= 2- troza larga); M- Total de tipos de máquinas de extracción y transporte de madera utilizada.

Extracción de madera (m= 1 (J-80 A); m= 2 (John Deere); m = 3 (Buey); m= 4-J-80<sup>a</sup>+Buey; m=5- John Deere + Buey).

Transporte de madera: m- 6 (KRAZ-257)-madera corta; m=7 (KAMAZ-4310)-madera larga; m=8 (Ural-4320)-madera larga.

##### **Parámetros:**

DM<sub>j</sub>-Demanda de madera en el destino j (j∈J); DMVTP- Demanda de madera de las unidades de transformación primaria; α-Máxima reducción tolerable para la variación de la demanda de madera en las unidades de transformación primaria; β- Máximo aumento tolerable para la variación de demanda de madera en las unidades de transformación primaria;  $t_{jk}^{lm}$  - Tiempo de extracción de madera de tipo i (i ∈ I) del patio de almacenamiento k (k ∈ K) con la maquina m (m ∈ M);  $\tau_{ik}$ - Disponibilidad de tiempo para la extracción de la madera del origen i (i ∈ I) al patio de almacenamiento k (k∈K);  $\tau_{kj}^{lm}$ -

Tiempo de transporte de la madera de tipo l(l∈L) del patio de almacenamiento k (k∈K) al destino j (j∈J) con la maquinaria m (m∈M);  $\tau_{kj}$ - Disponibilidad de tiempo para el transporte del patio de almacenamiento k (k∈K) al destino j (j∈J);  $R_{ik}^{lm}$ - Productividad de extracción (m<sup>3</sup>/ha) de la madera de tipo l (l∈L) del patio de almacenamiento k (k∈K) con la maquinaria m (m∈M);  $C_{ik}^{lm}$ - Costo unitario de extracción de la madera de tipo l (l ∈ L)

### III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

del rodal  $i(i \in I)$  al patio de almacenamiento  $k(k \in K)$  con la maquinaria  $m(m \in M)$ ;  $T_{kj}^{lm}$ - Costo unitario de transporte de la madera de tipo  $l(l \in L)$  del patio de almacenamiento  $k(k \in K)$  al destino  $j(j \in J)$  con la maquinaria  $m(m \in M)$ ;  $A_i$ - Area (ha) del origen  $i$  asociada al conjunto de patios de almacenamiento  $K$ ;  $ORC_i$ - Presupuesto destinado para las actividades de extracción de madera para un periodo determinado;  $ORC_t$ - Presupuesto destinado para las actividades de transporte de madera para un determinado periodo de tiempo;  $O_{orig}$ - Oferta de madera en todos los orígenes de transbordo;  $O_i$ - Oferta de madera en cada origen. Variables de Decisión y Variables de Destino:  $X_{ik}^{lm}$ - Volumen ( $m^3$ ) de madera  $l(l \in L)$  a ser extraída del rodal  $i(i \in I)$  al patio de almacenamiento  $k(k \in K)$  con la maquinaria  $m(m \in M)$ ;  $Y_{kj}^{lm}$ - Volumen ( $m^3$ ) de madera  $l(l \in L)$  a ser transportada del patio de almacenamiento  $k(k \in K)$  al patio de almacenamiento  $k(k \in K)$  con la maquinaria  $m(m \in M)$ ;  $n_i$  &  $p_i$ - son los desvíos negativos y positivos de la prioridad con respecto a su nivel de aspiración.

#### Formulación matemática del modelo genérico

$$\text{Lex Min } [(p_1); (p_2+p_3+p_4+p_5+p_6+p_7+p_8+p_9); (n_{10}+n_{11}+n_{12}); (n_{13})] \quad (10)$$

Así el modelo de programación por metas lexicográficas que indica la minimización de las variables de desvío no deseadas, generó un modelo específico constituido por 208 variables de las cuales 182 son variables de decisión y 26 variables de desvío, 5 metas subdivididas en 13 prioridades y 45 restricciones.

En la fase de extracción de madera, la solución del modelo indicó una mayor utilización del sistema de trozas largas (61,33 %) y del Skidder John Deere (79,38 %) para obtener metas establecidas. En relación al transporte, el sistema de trozas largas fue también el más indicado para la transportación. Siendo el camión Kamaz-4310 el de mejores resultados, al ser identificado para el transporte del 61,33 % de la madera.

Todas las demandas de madera fueron atendidas en todos los destinos. En los aserraderos Combate de la Tenería de Guane e Isabel Rubio, los volúmenes de maderas recibidas fueron exactamente iguales a las demandas.

Los resultados obtenidos indican que el modelo propuesto es capaz de auxiliar eficientemente, la planificación y extracción de la madera en la Empresa Agroforestal Macurije. Las combinaciones propuestas por el modelo permiten atender las demandas en las principales unidades de transformación primaria con las maquinas disponibles, en el tiempo disponible.

#### Modelación matemática para incrementar los rendimientos de madera aserrada de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barrett y Golfari

A partir del comportamiento de las dimensiones de la madera que se utiliza en el aserradero, es necesario definir un conjunto de procedimientos matemáticos que posibiliten incrementar los rendimientos de madera aserrada; partiendo de la definición en principio de la reducción del primer corte de apertura de las trozas, con la finalidad de aprovechar al máximo el mayor volumen de madera de calidad. Por lo que el problema matemático a resolver consiste en buscar una expresión que garantice el volumen máximo de una viga de base rectangular, en la solución de este problema se utilizan elementos importantes de geometría, así como la teoría de extremos de funciones de una variable real. A partir del análisis pertinente se establece que el corte

### III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

de apertura debe tener una amplitud que fluctúe entre los 11 – 13 cm para las clases diamétricas existentes, lo cual facilita una mayor eficiencia del proceso de aserrado de la madera.

#### **Modelos para estimar el rendimiento de madera aserrada a partir de las variables dendrométricas.**

Utilizando las variables independientes de mayor relación con la variable dependiente y de respuesta se obtuvieron ecuaciones de estimación del rendimiento de madera aserrada, los modelos comparados se observan a continuación:

$$L_n (\text{rend}) = 1,013 + 0,0519 * I_n d_{1,30} \quad (11)$$

$$L_n (\text{rend}) = 1,084 + 0,464 * I_n d_{1,30} - 0,1201 I_n \text{Con} \quad (12)$$

$$L_n (\text{rend}) = I_n 7,27119601 + (1,02303964 * I_n (d_{1,30})) \quad (13)$$

$$L_n (\text{rend}) = I_n 0,16089255 + (I_n (1,2660825) * d_{1,30}) \quad (14)$$

Las cuatro ecuaciones construidas para determinar el rendimiento de la madera aserrada tienen aceptables coeficientes de correlación, determinación y bajos errores estándar de estimación. Sin embargo, el mejor comportamiento lo posee el modelo  $L_n (\text{rend}) = 1,084 + 0,464 * I_n d_{1,30} - 0,1201 I_n \text{Con}$  que tiene mejor ajuste (las variables independientes explican el 67 % y el menor valor del error estándar de estimación).

A partir de estas ecuaciones se obtienen los resultados del cálculo de la longitud de corte por clases diamétricas para la especie objeto de estudio y que posibilita incrementar los volúmenes de producción y rendimiento de madera. Estos resultados posibilitan predecir con mayores niveles de exactitud la demanda real de madera en trozas como materias primas para el aserradero, ya que esta misma demanda se determina a partir de los rendimientos de madera en trozas según Leyva et al., 2017; Juízo et al., 2018 y Melo et al. 2019; proporcionando valores alejados de la verdadera demanda de madera y consecuentemente una planificación no adecuada de los volúmenes de trabajo de las diferentes etapas que componen la cadena de suministro bosque-aserradero.

#### **Manejo y utilización sustentable de la biomasa forestal**

Considerando los bajos niveles de información sobre las propiedades de trabajabilidad de la madera de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* Barret y Golfari, esta especie no es tomada en consideración por parte de los consumidores de muebles, lo cual implica la utilización fundamental de esta madera en el sector de la construcción; por lo que con la finalidad de elevar el valor agregado de la misma en el presente trabajo estaremos definiendo un conjunto de elementos que posibilitan elevar el valor agregado de la madera de *Pinus* a partir de la implementación de la tecnología para la producción de muebles de madera maciza y de piezas conformadas de láminas de madera.

Se define que la calidad de las propiedades de trabajabilidad de la madera en general, se determinó mediante la suma del porcentaje de piezas excelentes (E) y buenas (B) para cada uno de los ensayos, excepto en el ensayo de torneado, donde se incluye, además, el porcentaje de probetas clasificadas como regulares; coincidiendo con Valdés et al., (2018).



### III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

De acuerdo a los resultados del análisis de rugosidad en correspondencia con la norma de calidad superficial ISO 1302: 2002, podemos establecer que el *Pinus caribaea* var. *Caribaea* puede ser utilizada por la industria del mueble a gran escala para obtener artículos de alta calidad como alternativa de sustitución de especies actualmente sobreexplotadas. (Valdés et al., 2019)

#### **Análisis del proceso de elaboración de muebles de piezas curvadas de chapas de madera de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.**

El problema que pretendemos abordar está relacionado con las grandes existencias maderables que abundan en nuestros ecosistemas forestales que no son utilizadas en su plena potencia debido al desconocimiento de las posibilidades de aplicación como es el caso del *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* Barret y Golfari.

A partir de la tecnología para la producción de muebles de piezas conformadas de chapas de madera de diferentes grosores posibilita obtener un aprovechamiento máximo de los recursos disponibles; por lo tanto, pretendemos modelar matemáticamente el proceso de curvado encolado de piezas de chapas de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* Barret y Golfari para elevar la calidad de los elementos procesados; coincidiendo con Panic et al., (2016), así como Gaborik y Fekiac (2019); considerando que los radios de curvaturas obtenidos posibilitan la utilización de dicha especie para la producción de muebles de láminas de madera.

Los resultados obtenidos para la resistencia mecánica de las piezas conformadas de chapas de madera. El análisis de estos datos permite establecer que la especie investigada presenta resistencia mecánica acorde a las exigencias internacionales para la tecnología investigada. Esto es corroborado además si tenemos en cuenta que las magnitudes obtenidas están en los niveles de resistencia para la madera maciza. Esto es corroborado además si tenemos en cuenta que las magnitudes obtenidas están en los niveles de resistencia para la madera maciza. Por otra parte, es significativo mencionar que la resistencia de encolado y por tanto la facilidad de encolarse de la especie, es demostrada en el ensayo de resistencia a la hienda. Aspecto este de gran importancia para la conformación de muebles de elevada resistencia y durabilidad.

La Resistencia regulada puede ser utilizada para definir y direccionar de la calidad de las piezas durante los procesos de conformación, así como en los cálculos de los diseños de muebles para obtener estructuras con resistencia y durabilidad que satisfagan las exigencias del mercado consumidor, logrando con ello elevar el valor agregado de la madera como materia prima y ofertar un producto que logre diversificar la oferta de diseños de muebles sin disminuir la calidad de los procesos productivos.

#### **Conclusiones**

Los turnos técnicamente óptimos del *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y *Golfari* variaron entre 31 años y 35 años, según la calidad del sitio; corroborado a partir de la implementación de los modelos de programación por metas ponderadas



### III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL DE EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020

El arreglo factorial multivariado es un enfoque viable para una evaluación detallada del desempeño de los medios de extracción de madera; definiendo que los mejores resultados se obtienen a partir del sistema de aprovechamiento de troncos enteros en combinación con la maquina John Deere

El modelo de programación por metas lexicográficas es una herramienta eficiencia en el auxilio de la planificación de las actividades de extracción y transporte de la madera en la Empresa Agroforestal Macurije

La implementación de la definición de la dimensión del corte de apertura, de la programación matemática y el control estadístico del proceso de aserrado, posibilitan incrementar los rendimientos de madera aserrada en dependencia de las variables dendrometricas de los árboles de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* Barret y Golfari.

El *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea Barret y Golfari* en correspondencia con sus propiedades de trabajabilidad, radio de curvatura de la madera, así de sus propiedades de encolado, constituye una materia prima idónea para la producción de muebles de diversos tipos, posibilitando el aumento del valor agregado de esta materia prima.

#### **Bibliografía**

Aldea, J., Martínez, F., Romero, C., & Balteiro, L. 2014. Participatory Goal Programming in forest Management: An Application Integrating Several Ecosystem Services. *Forests*, v. 5, n. 12, p. 3352-3371.

Broz, D., Durand, G., Rossit, D., & Thomé, F. 2016. Strategic planning in a forest supply chain: a multigoal and multiproduct approach. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 47, n. 3, p. 297-307

Gaborik, J., Fekiac, J. 2019. Effect of structure of laminated wood on bending strength after cyclic loading. *Annals of Warsaw University of Life Science. Forestry and Wood Technology*, n. 105, p.20-29

Guera, M., Silva, A., Caracciolo R., Alvarez, D., & Barrero, H. 2019. Modelos matemáticos para la determinación del turno óptimo en plantaciones forestales. *Revista Madera y Bosque*, v. 25, n. 1, ee2511636.

Guera, M., Silva, A., Caracciolo R., Alvarez, D., Barrero, H., & Díaz, A.L. 2020. Enfoque multivariado en experimentos de extracción de madera en plantaciones forestales. *Madera y Bosques*, 2020, v. 26, n. 2.

ISO 1302:2002. Especificación geométrica de productos (GPS)Indicación de calidad superficial en la documentación técnica de productos. España.

Juizo, C.G., Rocha, M.P., & Rafael, A.L. 2018. Relação entre modelos de desdobro, rendimento e qualidade da madeira serrada de *Pterocarpus angolensis*. *Scientia Agraria Paranaensis. Sci. Agr. Parana*, v. 17, n.2, p. 213-219

Leyva, I., Rojas, A., & Segurado, Y. 2017. Determinación del rendimiento y calidad dimensional de la madera aserrada en aserríos en la provincia de Guantánamo. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. 2017; 5 (3):340-351.



**III ENCUENTRO CIENTÍFICO NACIONAL  
DE  
EDUCACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE 2020**

Liu, C., & Zhang, S. Y. (2005). Models for predicting product recovery using selected tree characteristics of Black spruce. *Can. J. Forest. Res.* 2005; (35):930-937

Machado, C.C. 2014. *Colheita florestal*. 2. Ed. Minas Gerais: Editora UFV, 2014. Cap. I, p. 15-45.

Melo, R.R., Dacroce, J. M., Rodolfo Jr, F., Lisboa, G.S., & França, L.C. 2019. Lumber yield of Amazona region. *Floresta e Ambiente*, v. 26, n.1: e20160311

Mousavi, R. 2012. Effect of log length on productivity and cost of Timberjack 450C skidder in the Hyrcanian forest in Iran. *Journal of Forest Science*, v. 58, n. 11, p. 473-482

Panic, L., Hodzic, A., & Nezirevic, E. 2016. Modern and sophisticated processes of 3d veneer plywood. *Acta Technica Corviniensis*. Fascicule 2, Tomo IX, p. 41-48.

Posavec, S., Beljan, K., Krajter, S., & Persun, D. 2012. Calculation of economic rotation period for even-aged stand in Croatia. *South East European Forestry*, 109-113. DOI: 10.15177/seeфор.11-12

Vanzetti, N., Broz, D., Corsano, G., & Montagna, J.M. 2018. An optimization approach for multiperiod production planning in a sawmill. *Forest Policy and Economics*, n.97, p. 1-18

Valdés, R.H., Fernández, R.R., Pupo, I., & Álvarez, D.A. 2018. Análisis de la calidad del cepillado de la madera de diferentes especies procedentes de Pinar del Río y Artemisa, Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, v. 6, n. 3, p. 272-283.

Valdés, R. H., Fernández, R.R., León, M.A., Cecilia, N., & Alvarez, D. 2019. Análisis de la rugosidad superficial de diferentes maderas en las provincias de Pinar del Río y Artemisa, Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, v. 7, n. 1, p.1-16

