

NOTA DE INVESTIGACIÓN
PRODUCTIVIDAD DE LA COSECHADORA FORESTAL EN PLANTACIONES
COMERCIALES DE EUCALIPTO (*Eucalyptus* spp.)

PRODUCTIVITY OF A FOREST HARVESTER IN COMMERCIAL
EUCALIPTUS (*Eucalyptus* spp.) PLANTATIONS

Imelda Vargas Abasolo¹, Leonardo Sánchez Rojas¹, Rigoberto Vargas Carballo¹,
Enrique Serrano Gálvez¹ y Diego Ernesto Lira González²

RESUMEN

Se evaluó la productividad de una cosechadora en plantaciones de eucalipto en Huimanguillo, Tabasco. En el trabajo de campo se realizó un estudio de tiempos y movimientos de jornadas completas durante nueve días, se registraron las actividades que involucraron a la cosechadora forestal y a su operador. En particular, se identificaron actividades improductivas causadas por fallas en la cosechadora y la falta de capacitación del operador. Al considerar las ocho horas efectivas laborales, la cosechadora trabaja 75.9% de su capacidad, mientras que 21% del tiempo total por turno corresponde a mantenimiento correctivo, de manera principal, por rompimiento de mangueras del aceite hidráulico; así mismo, el afilado de la sierra es el que más repercute en dicho mantenimiento. Se determinó que se carece de un programa de mantenimiento preventivo y en la cosecha se identificaron actividades improductivas. Para el análisis de productividad, se aceptó el modelo de la forma $y = a + bx + cx^2$. Los modelos de regresión usados son válidos cuando el volumen de producción mínimo es igual o mayor a 0.0126 m³, lo cual corresponde al volumen de una troza de 8 cm de diámetro por 2.5 m de largo. La información se evaluó con y sin tiempos improductivos (TI). La productividad máxima se obtiene cuando hay un volumen promedio del arbolado de 0.5534 m³ y se genera una productividad de 25.4147 m³h⁻¹; para el segundo caso, ocurre con un volumen promedio del arbolado de 0.56627 m³ y una productividad de 27.7661 m³h⁻¹.

Palabras clave: Aprovechamiento, ciclo de cosecha, mantenimiento correctivo, modelos de regresión, tiempos y movimientos, volumen.

ABSTRACT

The evaluation of productivity of a forest harvester was conducted in *Eucalyptus* plantations in Huimanguillo, Tabasco state. Field work included a full-time study of time and movements for nine days, where all activities that involved forest harvesting and its operator were registered. Unproductive activities were identified as caused by the harvester's failures and the operator's lack of training. Considering the eight effective working hours, the harvester works at 75.9% of its capacity, 21% of the total time per shift corresponds to corrective maintenance, mainly due to the breaking of the hydraulic oil hoses. It was concluded that no preventive maintenance program exists. At harvest, unproductive activities were detected, as well as a lack of a preventive maintenance program. For the productivity analysis, a model of the $y = a + bx + cx^2$ form was accepted. The regression models used are valid when the minimum volume of production is equal to or greater than 0.0126 m³, which corresponds to the volume of a log of 8 cm in diameter and 2.5 m long. The information was evaluated with and without unproductive activities (IT). The maximum productivity is obtained when there is an average volume of 0.5534 m³ generating a productivity of 25.4147 m³h⁻¹. For the second case, the maximum profit occurs with an average volume of 0.56627 m³ and productivity per hour of 27.7661 m³h⁻¹. A lower profit was generated when including unproductive activities compared with the ideal way that harvester should work.

Key words: Logging, harvest cycle, corrective maintenance, regression models, time and movements, volume.

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2010

Fecha de aceptación: 21 de junio de 2012

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Correo-e: imeldavargas@gmail.com

² Bayer de México, S.A. de C.V.

INTRODUCCIÓN

Los bosques mexicanos tienen una gran capacidad de producción; sin embargo, no se aprovechan de manera eficiente debido, entre otros factores, a la sobreregulación, la escasa inversión y desarrollo tecnológico, la legislación fiscal, la carencia de subsidios y estímulos agropecuarios más atractivos que los forestales, la falta de acceso a financiamientos competitivos, el deterioro de la infraestructura caminera y de producción, y el enorme mercado ilegal (Zúñiga, 2009).

La escasa inversión y desarrollo tecnológico se debe a que, en la actualidad, las técnicas de producción forestal son atrasadas y la maquinaria es anticuada, los productores y contratistas no ganan lo suficiente para renovar su tecnología debido a los altos costos y baja productividad, y a que, cuando existen condiciones para la modernización, se enfrentan a la carencia de mano de obra calificada (CONAFOR, 2001). En el caso del aprovechamiento forestal, México cuenta con un bajo nivel tecnológico y, en ocasiones, obsoleto, tanto en la extracción como en el transporte de la madera (Sánchez *et al.*, 2005; Sánchez y García, 2008). Lo anterior conlleva la sustitución de materias primas nacionales por unas importadas, lo cual provoca desempleo, migración y salida de divisas (CONAFOR, 2001).

Por otra parte, las oportunidades que presenta el sector forestal son las siguientes: mano de obra con bajo costo y facilidad de capacitación, disponibilidad de materias primas en bosques templados y precios razonables de insumos (CONAFOR, 2001); no obstante, los apoyos para el desarrollo o introducción de tecnologías son escasos y están limitados a bosques naturales (SEMARNAT, 2008); además, son insuficientes, ya que tienen montos por debajo de los costos de los equipos que se requieren: en la actualidad, los montos de apoyo oscilan alrededor de 65,000 USD, mientras que los precios de los equipos de procesamiento y extracción forestal van de 250,000 a 650,000 USD por equipo.

Las perspectivas para el desarrollo del sector forestal en América Latina y el Caribe, se concentran principalmente en inversiones de capital en maquinaria y, en menor escala, en la capacidad humana (FAO, 2007). Se ha invertido en equipo especializado como las cosechadoras forestales, las cuales son muy eficientes y acaparan el mercado, ya que realizan las fases de tala, desrame, medición, tronzado, despunte, apilado de las trozas y descortezado (Nieto, 2010). Para el caso de México, en junio de 2008 se introdujo el primer cabezal de procesamiento forestal en plantaciones de eucalipto en el sureste (Monreal, 2008). En el país existen cuatro cabezales de cosecha: un Kesla, dos Risley y un SP; sin embargo, este avance en el desarrollo de la tecnología forestal está limitado debido a la falta de mano de obra calificada y a la productividad.

INTRODUCTION

Mexican forests have a large production capacity. However, they are not efficiently exploited because of overregulation, fiscal legislation, lack of investment and technological development, lack of subsidies and agricultural and livestock incentives that are more appealing than forestry incentives, lack of access to competitive financing, deterioration of the roads and poor production infrastructure (Zúñiga, 2009).

The current poor investment and technological development are a consequence of outdated forest production techniques and old machinery, as well as of the fact that producers and contractors do not make enough money for renovating their technology, due to high costs and low productivity, and of the fact that, whenever there are adequate conditions for modernization, there is a lack of skilled workforce (CONAFOR, 2001). Mexico has a low technological level in forest exploitation, even obsolete at times, both for timber extraction and transportation (Sánchez *et al.*, 2005; Sánchez and García, 2008). This implies the substitution of local inputs by foreign ones, which results in unemployment, migration and currency outflows (CONAFOR, 2001).

Moreover, the opportunities set forth by the forest sector are the following: low cost labor and facilities for training, availability of inputs in temperate rainforests and reasonable prices of inputs (CONAFOR, 2001). However, incentives for development and introduction of technology are scarce and limited to natural forests (SEMARNAT, 2008). Besides, they are insufficient, since the amounts they represent are beneath the costs of the required equipment. Nowadays, the incentives are somewhere around 65,000 USD, while the prices of equipment for timber processing and extraction range from 250,000 to 650,000 USD, depending on the equipment.

Perspectives for forestry development in Latin America and the Caribbean at all scales are mainly focused on investing capital on machinery and, at a lower scale, on human capacity (FAO, 2007). In the case of forest harvesting, there have been investments in specialized equipment, such as forest harvesters, which are very efficient and monopolize the market since they perform felling, delimbing, mensuration, cutting off, tipping, piling up and debarking phases (Nieto, 2010). In the Mexican case, the first harvester head was introduced in eucalyptus plantations in the Southeast (Monreal, 2008). There are four harvester heads in the country: a Kesla, two Risleys, and an SP. However, this advance in the development of forest technology in Mexico is limited, due to the lack of skilled workforce and productivity.

The evaluation was carried out in Huimanguillo municipality, Tabasco state, along with the Proveedora Silvícola Internacional (PSI), who provided services as contractor for the harvesting of forest eucalyptus timber plantations for Proplanse S.A. de C.V.

La evaluación se llevó a cabo en el municipio Huimanguillo, Tabasco, con la empresa Proveedor Silvícola Internacional (PSI), la cual brindaba sus servicios como contratista para la cosecha de plantaciones forestales de madera de eucalipto a la compañía Proplanse S.A. de C.V.

En el trabajo de campo se usaron cámara de video y fotográfica (Fujifilm, modelo FinePixS5700), tripié, computadora portátil, cronómetro, cinta adhesiva, memorias SD y formatos para el vaciado de información. Este material fue necesario dado que se requería un cronometraje continuo; así mismo, para evitar errores, se recurrió al análisis de grabaciones mediante video de la actividad de cosecha (Tolosana *et al.*, 2004). Respecto al trabajo en gabinete, se emplearon computadora, cronómetro y formatos para el vaciado de tiempos de los videos.

La cosechadora forestal es un cabezal Kesla modelo 30RHS, adaptado a una excavadora de oruga Caterpillar 320D (Figura 1).

In fieldwork, a video camera, a photographic camera (Fujifilm, FinePixS5700), a tripod, a laptop, a chronometer, duct tape, SD memory cards, and forms for capturing data were used. This material was necessary, since a continuous timekeeping was required. For avoiding errors, the video taken during harvesting was analyzed (Tolosana *et al.*, 2004). In the case of deskwork, a computer, chronometer and forms for introducing the duration and timing of videos were used.

The harvester used is a Kesla harvester head, 30RHS model, adapted to a Caterpillar 320D excavator (Figure 1).

The Kesla 30RHS harvester head, built for harvesting trees with a diameter of up to 50 cm, has claws that open up to 68 cm. It is designed for its incorporation in excavators of 18 to 25 t. According to Hartsough and Cooper (1999), the variables analyzed in each data sample were these:

- Working days
- Individual tree processing



Figura 1. Cosechadora forestal, cabezal Kesla adaptado a la excavadora Caterpillar, Huimanguillo, Tabasco.
Figure 1. Forest harvester, Kesla harvester head adapted to Caterpillar excavator, Huimanguillo, Tabasco.

El cabezal cosechador Kesla modelo 30RHS, construido para cosecha de árboles con un diámetro de hasta 50 cm, tiene una apertura máxima de las garras de 68 cm. Está diseñado para el montaje en excavadoras de 18 a 25 t. De acuerdo con el trabajo de Hartsough y Cooper (1999), las variables analizadas de cada muestra de datos fueron las siguientes:

- Jornadas de trabajo
- Procesamiento de árboles individuales

El tamaño de la muestra de datos fue de 9 días, se registró información de jornadas completas y para el caso de las operaciones de procesamiento individual de los árboles por hora, según los cálculos, la muestra es de 38 h, y el estudio contempló un total de 47 h.

The size of the data sample was 9 days, information from the complete working days was collected, and, according to calculations, in the case of individual tree processing operations per hour, the sample amounts to 38 h, and the study contemplated a total of 47 h.

Information from the entire working days was obtained at the field, and the activities and execution times required by the harvester for functioning were registered. For these working days, productive working times were calculated for harvesting and non-operational activities, such as physiological needs, journeys, interruptions, and both preventive and corrective maintenance activities. It was considered that the working day began with the transportation from the base or camp to the plantation.

En campo se obtuvo información de jornadas completas y se registraron las actividades y tiempos de ejecución requeridos por la cosechadora para su funcionamiento. Para estas jornadas se tomaron tiempos de trabajo productivos correspondientes a la cosecha, actividades no operativas como necesidades fisiológicas, desplazamientos, interrupciones y actividades de mantenimiento preventivo y correctivo. Se consideró el inicio de la jornada laboral desde el transporte de la base o campamento a la plantación.

En cuanto a la toma de tiempos de la cosecha se consideró que la cosechadora, durante el derribo y procesamiento de un árbol, realiza las siguientes actividades:

1. Movimiento: cualquier movimiento para ir de un árbol a otro.
2. Limpieza: remoción de árboles talados, maleza, árboles no comerciales y otros materiales que afecten la caída de los árboles comerciales.
3. Posicionamiento: colocación del cabezal alrededor del árbol en pie para derribarlo.
4. Derribo: corte del árbol, desde que la sierra empieza a funcionar, hasta el corte total de la base del árbol.
5. Manipulación: movimiento de la pluma cuando el cabezal tiene un árbol cortado, siempre que la máquina no esté realizando otras funciones simultáneamente.
6. Descortezado y desrame: alimentación a las cuchillas con el árbol derribado.
7. Troceo: corte de trozas en longitudes especificadas en la máquina.

Las actividades por turno se clasificaron de esta forma:

1. Transporte de personal: transporte del campamento a la plantación.
2. Transporte de cosechadora: transporte de la base a la zona de cosecha.
3. Mantenimiento de rutina: actividades de mantenimiento diario.
4. Mantenimiento preventivo: actividades de mantenimiento para prevenir fallas.
5. Mantenimiento correctivo: Actividades de reparación por rompimiento de piezas en la cosechadora y fallas en la misma.
6. Cosecha: procesamiento del arbolado para obtener trocería.
7. Abastecimiento de combustible: suministro de diesel a la máquina.
8. Calentamiento: preparación de la cosechadora antes de empezar a laborar.
9. Enfriamiento de cosechadora: cuando se calienta el hidráulico.

In the case of timing for harvesting, it was considered that the harvester performs the following tasks during downing and processing:

1. Movement: any movement from one tree to another.
2. Cleaning: removal of felled trees, weeds, non-commercial trees, and other materials that affect felling of a commercial tree.
3. Positioning: putting the harvester head around the standing tree in order to fell it.
4. Downing: cutting the tree, from the moment the saw starts functioning to the moment the base of the tree has been entirely sawed.
5. Manipulation: movement of the instrument when the harvester head is holding a felled tree, as long as the machine is not performing other functions at the same time.
6. Debarking and delimbing: feeding the blades with the felled tree.
7. Logging: cutting the tree into logs of a size specified in the machine.

The activities per shift were classified as follows:

1. Staff transportation: transportation from camp to plantation.
2. Harvester transportation: from the base to the harvesting area.
3. Routine maintenance: daily maintenance activities.
4. Preventive maintenance: maintenance activities meant for preventing failures.
5. Corrective maintenance: activities for repairing parts of the harvester that break down or any harvester malfunction.
6. Harvesting: tree processing for producing logs.
7. Fuel supply: supplying the machine with diesel.
8. Warming up: preparing the harvester before working.
9. Cooling down: when the hydraulic oil heats up.
10. Sharpening: sharpening the chain of the bar.
11. Chain loosening: dismantling the chain of the operating bar.
12. Needs: rest, personal needs and feeding time.
13. Distractions: activities unrelated to harvesting.

From the nine sampled days, a percentage representing each activity performed during the working day, as well as the average time for each activity with standard deviation, maximum and minimum values, were obtained using a spreadsheet (Microsoft Excel®, v 2007).

The volume of each log was determined with the two diameters registered in the machine, using the following formula:

10. Afilado: afilado de cadena de la barra.
11. Desajuste de cadena: desmonte de la cadena de la barra en operación.
12. Necesidades: descanso, necesidades personales y tiempo de alimentos.
13. Distracciones: actividades que no se relacionan con la cosecha.

A partir de los nueve días muestreados se obtuvo el porcentaje que representó cada actividad en la jornada laboral, el promedio de tiempos de cada actividad con la desviación estándar, valores máximos y mínimos, con apoyo de una hoja de cálculo (Microsoft Excel®, versión 2007).

El volumen de cada troza se determinó con los dos diámetros registrados en la máquina mediante la siguiente fórmula:

$$V = \left(\frac{Dp}{2} \right)^2 (\pi) (L)$$

Donde:

V = Volumen (m³)
 Dp = Diámetro promedio (m)
 L = Longitud de la troza (m)

Con el diámetro de cada árbol se procedió a analizar cada volumen con su tiempo de procesamiento.

Se estudiaron cada una de las actividades por turno, incluida la cosecha como una actividad global. Después, se examinó la cosecha de manera independiente, al descomponerla en ciclos o tiempo de procesado de cada árbol.

Para el tiempo de ejecución de cada tarea, así como para el volumen de madera, se determinó el promedio, la desviación estándar y el porcentaje, y se construyeron gráficas para el análisis.

Para el de productividad, se utilizaron los siguientes modelos de regresión lineal para relacionar la productividad (Y) con el diámetro de la base o el volumen individual del árbol (X), de acuerdo con las experiencias de los trabajos de Hartsough y Cooper (1999) y Visser *et al.* (2009):

- Modelo lineal: $Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$
- Modelo de polinomio de segundo grado:
 $Y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon$
- Modelo logarítmico:
 $Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(x) + \varepsilon$
- Modelo potencial:
 $Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(x) + \varepsilon$

Los modelos se corrieron en dos categorías; en la primera, se consideraron los tiempos improductivos del ciclo de

$$V = \left(\frac{Dp}{2} \right)^2 (\pi) (L)$$

Where:

V = Volume (m³)
 Dp = Average diameter (m)
 L = Length of log (m)

Using the diameter of each tree, the volume and processing time were analyzed.

The activities per shift were studied, including harvesting as a global activity. Afterwards, harvesting was examined independently, decomposed into cycles and processing time for each tree.

For the execution time of each activity, as well as for the timber volume, the average, standard deviation and percentage were determined, and graphs were elaborated for analysis.

When analyzing productivity, the following linear regression models were used to relate productivity (Y) to the base diameter or the individual volume of each tree (X), according to the experiences of Hartsough and Cooper (1999) and Visser *et al.* (2009):

- Linear model: $Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$
- Second degree polynomial model:
 $Y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon$
- Logarithmic model:
 $Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(x) + \varepsilon$
- Power model:
 $Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(x) + \varepsilon$

The models were applied in two categories: in the first one, unproductive times of the harvesting cycle were considered, whereas they were not in the second one. The first case is the real situation in which the machinery operated; the second case is the ideal condition in which it should function.

In each category, the four regressions used were applied twice, assigning different values to X: in the first analysis, X=tree size in m³, and, in the second, X=base diameter of tree (cm). Since the normal diameter of the tree was not available, the base diameter was used.

In order to determine the maximum X* volume of trees, which allows the highest productivity, the unrestricted optimization principle was used, which establishes two conditions (Varian, 1992; Chiang and Wainwright, 2006 and Nicholson, 2007):

cosecha, mientras que en la segunda no. El primer caso es la situación real en la que operó la máquina; el segundo caso es la condición ideal en la que debería trabajar.

En cada categoría, las cuatro regresiones usadas se corrieron dos veces y se les asignaron diferentes valores a X ; así, en el primer análisis, X = tamaño del árbol en m^3 y, en el segundo, X = diámetro de la base del árbol (cm). Debido a que no se contaba con el diámetro normal del árbol se consideró el de su base.

Para conocer el volumen máximo del arbolado X^* , donde existe mayor productividad, se utilizó el principio de optimización sin restricciones, el cual establece dos condiciones (Varian, 1992; Chiang y Wainwright, 2006 y Nicholson, 2007):

Condición de primer orden o condición necesaria:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0$$

Condición de segundo orden o condición suficiente:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x} \leq 0$$

Una vez que se obtiene el volumen del arbolado, el valor X^* se evalúa en la función $y^* = f(x^*)$ para obtener la máxima productividad (m^3h^{-1}).

Tiempos por turno

En total, los nueve días muestreados suman 101.6 h, las cuales incluyen la cosecha y las actividades complementarias. Cada día, en promedio, fue de 11.2 h laborales, con una desviación estándar de 41 min. Se calcula que la cosecha representó 53.8% del tiempo total, la cual, en promedio por día, fue de 6 h, con una desviación estándar de 2.1 h, un máximo de 8.7 h y un mínimo de 1.95 h. El transporte de personal y las necesidades constituyeron 7 y 5.7% del tiempo total. El abastecimiento de combustible significó 1.8% y las demás actividades, menos de 3%.

El horario correspondiente al inicio de labores no era fijo, pues variaba de 6:00 a 8:00 a.m. Esta etapa se consideró desde la partida de la base o campamento a la plantación. El tiempo para trasladar al personal cambió en función del lugar de salida, ya que en ocasiones fue desde Las Choapas, Veracruz (lugar de origen del personal) y otras de una localidad cercana a la plantación. Por lo anterior, el tiempo de esta actividad osciló entre 15 min y 1.7 h, y el final de la jornada entre 5:30 y 6:30 p.m.

El mantenimiento correctivo es una actividad que representa 21% del total de la producción, con una media por día de 2.6 h y una desviación estándar de 1.9 h, con un máximo de 5.6 h y un mínimo de 5 min.

First-order or necessary condition:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0$$

Second-order or sufficient condition:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x} \leq 0$$

Once the volume of the trees has been obtained, the value of X^* is evaluated using the function to obtain the maximum productivity (m^3h^{-1}).

Times per shift

The nine days of the sample amount to a total of 101.6 h, which include harvesting and complementary activities. Each working day lasted an average of 11.2 h, with a standard deviation of 41 min. It has been calculated that 53.8% of the total time was used for harvesting, which took an average of 6 h a day, with a standard deviation of 2.1 h, a maximum of 8.7 h and a minimum of 1.95 h. Transportation of personnel and satisfaction of needs represented 7 and 5.7% of the total time. The supply of fuel represented 1.8%, and the other activities, less than 3%.

There was not a fixed hour for the beginning of labors, that is, they usually started between 6:00 and 8:00 am. The time for transporting the staff changed depending on the place of departure, since sometimes they departed from Las Choapas, Veracruz state (their place of origin), and some others from a locality near the plantation. Therefore, the duration of this activity spanned from 15 min to 1.7 h, and the end of the working day was usually between 5:30 and 6:30 p.m.

Corrective maintenance is an activity that represents 21% of the total production time, with a daily mean of 2.6 h and a standard deviation of 1.9 h, a maximum of 5.6 h and a minimum of 5 min.

The harvester worked only 53.8% of the total time of the working shift, due to corrective maintenance activities performed every day to correct broken hoses that carry the hydraulic oil. The time necessary for changing such hoses or the corrective maintenance time was long, due to the lack of spare parts and tools for removing the broken pieces, and to the inadequate coordination of the staff in charge of maintenance. Therefore, it varied from 15 min, if the spare part was available, to 5.6 h. The hoses for hydraulic oil got broken when forced, which was more usual when trees with a diameter of over 40 cm were processed. This situation can be attributed to the fact that the harvester head from this study was designed to process softwoods, so its resistance is lower when it processes eucalyptus timber, whose density is higher.

La máquina cosechadora trabajó solo 53.8% del tiempo total del turno laboral, debido al mantenimiento correctivo realizado todos los días a causa del rompimiento de mangueras donde circula el aceite hidráulico. El tiempo de sustitución de dichas mangueras o tiempo de mantenimiento correctivo era largo por la falta de refacciones y herramienta para retirar las piezas rotas, y por la incorrecta coordinación del personal a cargo del mantenimiento; de tal forma, tuvo una variación de 15 min, si se contaba con la refacción, hasta 5.6 h. Las mangueras del aceite hidráulico se rompieron cuando se forzaban, lo cual era más común al procesar árboles mayores de 40 cm de diámetro normal. Esta situación también se puede atribuir a que el cabezal de la cosechadora de este estudio fue diseñado para procesar coníferas, por lo que su resistencia es menor con la madera de eucalipto, cuya densidad es mayor que la de coníferas.

Otra de las causas probables del rompimiento de las mangueras pudo ser la incorrecta manipulación del operador, ya que no se le capacitó para el manejo de este tipo de maquinaria.

No obstante, al considerar las 8 h efectivas de trabajo programadas para una cosechadora forestal, junto con los datos obtenidos, este cabezal trabajó a 75.9% de su capacidad, lo que indica que está dentro del intervalo productivo aceptable (Brinker *et al.*, 2002); sin embargo, para que una cosechadora forestal sea rentable, debe trabajar mínimo dos turnos de 8 h productivas.

En general, la cosechadora no contó con un programa de mantenimiento preventivo, el cual, en promedio, es de 12 min día⁻¹. Sólo consistió en actividades básicas como la aplicación de aceite a la cadena y bomba de la sierra, la limpieza de barra de la sierra, el ajuste de mangueras y el engrasado de rodillos.

El mantenimiento de rutina fue mínimo de 1.6 % del total de las actividades. Antes del inicio de la cosecha en cada turno laboral, se verificó el nivel del hidráulico y se purgó para que inyectara presión en el momento de la operación.

El desajuste de cadena fue de 13.7 s día⁻¹ en promedio, equivalente a 0.9% del total de las actividades; esto se puede atribuir a una cadena agrandada por sobrecalentamiento o a una barra deforme.

Las etapas de enfriamiento de la cosechadora se hicieron en el periodo caluroso, ya que el aceite hidráulico se sobrecalentó en niveles más elevados.

La excavadora usada en la empresa ya mencionada para cosecha, está diseñada para la industria de la construcción, donde el flujo de aceite hidráulico es mínimo, a diferencia de lo que ocurre en la cosecha de plantaciones, donde está en constante movimiento y su rotación es continua. Por esta razón, se generó un sobrecalentamiento, el cual fue más notorio con la alta temperatura del medio ambiente.

Another probable cause for hoses breaking could have been the inadequate handling, because the operator was not trained for handling this kind of machinery.

Moreover, when considering the 8 effective working hours programmed for a forest harvester, along with the data obtained, this harvester head worked at 75.9% of its capacity, which indicates that it worked within the range of acceptable productivity (Brinker *et al.*, 2002). However, in order to make a harvester profitable, it should at least work for two shifts of 8 productive hours.

In general terms, there was not an actual preventive maintenance program for the harvester, which takes an average of 12 min day⁻¹. It only consisted of basic activities, such as applying oil to the chain and bomb of the saw, cleaning the saw's bar, adjusting the hoses and lubricating the rollers.

The routine maintenance was minimal, and amounted to 1.6% of the total of activities. Before harvesting began in each shift, the hydraulic oil level was verified and drained so that pressure was injected during operation.

The chain loosening took an average of 13.7 s day⁻¹, which is 0.9% of the total of activities. It can be attributed to an engrossed chain due to overheating or to a deformed bar.

The cooling off stages of the harvester took place during the warm period, since the hydraulic oil was overheated at more elevated levels.

The harvester used by the company mentioned above is designed for construction, where the flow of hydraulic oil is minimal, unlike what happens in plantation harvesting, where it is in constant movement and its rotation is continuous. Therefore, there was an overheating, which was more evident as the temperature of the environment is high.

The CAT-320D excavator has only one radiator designed for cooling down the levels of hydraulic oil, because of the end it was designed for. On the other hand, forest excavators have double radiator, which means the cooling down system is more efficient.

Therefore, the overheating of the oil can be attributed to the absence of a second radiator and the lack of hygiene of the ventilation system, which can be solved using pressurized water (Brizzio, 2009). Sharpening, performed manually, constituted 2.2% of the total working time during the 9 days analyzed: an average of 22 min day⁻¹, with a standard deviation of 2.1 min. In previous measurements made to define the methodology for collecting data in the field, the sharpening was performed from two to four times in each shift, which took around 1 h for each activity.

La excavadora CAT-320D, de acuerdo al uso para el que se creó, solo posee un radiador encargado de enfriar los niveles de aceite hidráulico, en cambio, las excavadoras forestales tienen un doble radiador, lo que representa un sistema de enfriamiento más eficiente.

Por lo anterior, el sobrecalentamiento del aceite hidráulico se puede atribuir a la ausencia de otro radiador y a la falta de limpieza del sistema de ventilación, lo que se soluciona con agua a presión (Brizzio, 2009). El afilado, realizado de forma manual, constituyó 2.2% del tiempo total laboral de los nueve días analizados: 22 min día⁻¹ en promedio, con una desviación estándar de 2.1 min. En mediciones previas efectuadas para definir la metodología de toma de datos en campo, el afilado fue de dos a cuatro veces por turno laboral, lo que implicó alrededor de 1 h para esta actividad.

Tiempos del ciclo de cosecha

De los nueve días muestreados, se obtuvieron 47 h de cosecha de la máquina, equivalentes a la cosecha de 2,554 árboles, lo cual comprendió movimiento, limpieza, posición, derribo, manipulación, descortezado-desrame y troceo.

En este estudio, el equipo cosechó en promedio 21 m³ h⁻¹, con un máximo de 28.7 m³ y un mínimo de 14.4 m³ y se procesaron cerca de 69 árboles h⁻¹, con un máximo de 87 y un mínimo de 42 árboles h⁻¹. El uso de este tipo de maquinaria en México es reciente, pues fue introducida en julio de 2008, y este es el primer trabajo realizado en el área y corresponde a la primera cosechadora forestal; por lo tanto, es prematuro argumentar que el rendimiento de cosecha sea alto o bajo porque aún se carece de parámetros para ser comparados. Sin embargo, al considerar rendimientos de otros países con el uso de esta tecnología, como el caso de bosques de maderas duras de Francia, se han obtenido rendimientos por máquina de entre 6 y 8 m³ h⁻¹ (Bigot y Cuchet, s/f); comparado con México, este rendimiento es bajo, pues se indica que las condiciones del terreno de bosque natural tienen diferentes características respecto a aquellas de las plantaciones. En cuanto a bosques de picea en Canadá, se han logrado rendimientos en promedio de 74 árboles por hora productiva de máquina, lo que equivale a 9.6 m³ h⁻¹ (González, s/f). En la VIII Región de Chile, mediante el uso de GPS, se reporta una productividad de 18.35 m³ h⁻¹ (Cordero *et al.*, 2006) y registra en plantaciones forestales de eucalipto en Uruguay, la empresa Ritrok ha tenido rendimientos de cosecha forestal de 17.5 a 19.0 m³ h⁻¹ (Brizzio, 2009). En relación a bosque natural, se estima que, en promedio, para el caso de árboles accesibles en diámetros pequeños (15-25 cm), el rendimiento es de 10 m³ h⁻¹ y, con diámetros medios (25-35 cm), de 12 a 13 m³ h⁻¹; sin embargo, puede aproximarse a los 15 m³ h⁻¹ en diámetros mayores y condiciones óptimas de trabajo (Arranz *et al.*, 2007).

Harvesting cycle times

From the nine days analyzed, machine harvesting took 47 h, equivalent to harvesting 2,554 trees, which includes moving, clearing, position, downing, manipulating, delimbing, debarking and logging.

In this study, the equipment harvested an average of 21 m³ h⁻¹, from a maximum of 28.7 m³ and a minimum of 14.4 m³, and around 69 trees h⁻¹ were processed with 87 maximum and 42 trees h⁻¹ as minimum. This kind of machinery has only been recently used in Mexico, and this is the first research performed in this area, corresponding to the first forest harvester introduced in the country in July, 2008. Therefore, it is quite soon to argue about its performance, since there are no parameters for comparison. Yet, the performance of this technology can be compared to that of other countries that have implemented it, such as the case of the hardwood forests in France, where a machine harvests between 6 and 8 m³ h⁻¹ (Bigot and Cuchet, n/d). The comparison indicates that the performance of the machine in Mexico is low, but it has been indicated that the natural forest land has different qualities than that of plantations. In the case of *Picea* forests in Canada, the machine harvests an average of 74 trees h⁻¹, which is equivalent to 9.6 m³ h⁻¹ (González, n/d). In the VIII Región de Chile, the use of GPS has reported a productivity of 18.35 m³ h⁻¹ (Cordero *et al.*, 2006), and in eucalyptus forest plantations in Uruguay, Ritrok company has reported a forest harvesting performance that ranges from 17.5 to 19.0 m³ h⁻¹ (Brizzio, 2009). In relation to the natural forest, it is estimated that, in the case of accessible trees with small diameters (15-25 cm), the average performance is 10 m³ h⁻¹, and with medium diameters (25-35 cm), it is from 12 to 13 m³ h⁻¹. Yet, it can approximate to 15 m³ h⁻¹ in the case of larger diameters, under optimal work conditions (Arranz *et al.*, 2007).

The size of logs used in this research was 2.50 m, with an average diameter of 25.3 cm and a standard deviation of 6.7 cm. On the other hand, the volume of each one was 0.30 m³, with a standard deviation of 0.23 m³. Each tree produced from two to ten logs.

The harvesting cycle lasted an average of 49 s, with a standard deviation of 21.7 s, which is quite variable because it depends on the following factors: size of the trees (volume), bifurcations, crooked and dry trees, as well as spacings of over 3 m between trees. A research on times and movements carried out in eucalyptus plantations (*Eucalyptus viminalis* Labill.) in New Zealand, reported an average harvesting cycle of 47 s (Hartsough and Cooper, 1999), which is similar to the Mexican harvesting cycle, with a variation of 2 s.

Table 1 shows the average time for each activity in the harvesting cycle: the one that took the longest time was logging, with a mean of 16.7 s and a standard deviation of 8.3 s; it was followed by debarking-delimbing, with 13.10 s and a standard

El tamaño de las troza empleadas en esta investigación fue de 2.50 m y presentaron un diámetro de 25.3 cm en promedio, con una desviación estándar de 6.7 cm; por otra parte, el volumen de cada una fue de 0.30 m³, con una desviación estándar de 0.23 m³. Un árbol tuvo de dos a diez trozas.

En promedio, un ciclo de cosecha mantuvo una duración de 49 s con una desviación estándar de 21.7 s, la cual es muy variable debido a que está en función de los siguientes factores: tamaño del arbolado (volumen), bifurcaciones, árboles torcidos y secos, así como espaciamiento mayor de 3 m entre un árbol y otro. En un estudio de tiempos y movimientos llevado a cabo en plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus viminalis* Labill.) de Nueva Zelanda, se obtuvo un promedio del ciclo de cosecha de 47 s (Hartsough y Cooper, 1999); similar al del ciclo de cosecha de México con una variación de 2 s.

En el Cuadro 1 se señala el promedio de tiempo de cada actividad del ciclo de cosecha: la que ocupó mayor tiempo fue el troceo, cuya media fue de 16.7 s con una desviación estándar de 8.3 s; en seguida, el descortezado-desrame, con 13.10 s y una desviación estándar de 7.01 s; por su parte, aquella que consumió menor tiempo fue la manipulación, con 2.99 s en promedio, y una desviación estándar de 3.48 s. En cada ciclo todas las actividades se repitieron, excepto la limpieza, pues fue intermitente y sólo se presentó cuando existió obstrucción por lianas, arbustos y árboles secos.

El troceo y el descortezado-desrame utilizaron el mayor porcentaje de tiempo del ciclo de producción: el primero 29% y el segundo 22%. El tiempo de posición, derribo y manipulación fue mínimo.

Aunque el movimiento de la cosechadora representó solo 14% del tiempo total del ciclo, el operador no derribó los árboles de manera uniforme, pues no se guio por las líneas de árboles, ya que la cosecha se hizo en forma desordenada, lo que implicó un mayor movimiento para trasladarse de un árbol a otro y, a continuación, repercutió en la extracción, pues no existía una zona de circulación abierta para los tractores.

Pese a que en la plantación no están bien definidas las hileras del arbolado, el operador debe trabajar en una sola dirección en las calles, en general, de 14 a 18 m (dos veces el alcance de la grúa), debe colocar los residuos de corta en la calle, para que sirvan de colchón a su paso y al de la máquina que hará la extracción (Tolosana et al., 2004).

En el descortezado y desrame no se eliminó la corteza en su totalidad, lo cual se pudo atribuir a que el tipo de cabezal está diseñado para coníferas; este representó 22% del total del ciclo, mientras que el troceo, 29%.

deviation of 7.01. The activity that consumed the less time was manipulation, with an average of 2.99 s, and a standard deviation of 3.48 s. All activities were repeated in each cycle, except cleaning, which was intermittent and performed only when there was obstruction caused by lianas, shrubs and dried trees.

Logging and debarking-delimbing required the highest percentage of time per production cycle: the first required 29%, and the latter 22%. The positioning, downing and manipulation times were minimal.

Although the movements of the harvester required only 14% of the total cycle time, the operator did not fell the trees in a uniformed way -he did not follow the line of trees, and the harvesting was performed disorderly, which implied an increased distance when moving from tree to tree and also impacted the extraction, since there was not an open circulation area for tractors.

Despite the fact that the rows of trees were not well defined in the plantation, the operator should have worked in only one direction, in general terms, in lanes of 14 to 18 m (twice the capacity of the crane), should have put the felling residues in the lane to be used as a bed when both it and the extracting machine went through (Tolosana et al., 2004).

During debarking and delimbing, the bark was not entirely eliminated, which can be attributed to the fact that the kind of harvester head is designed for conifers; this represented 22% of the entire cycle, whereas logging represented 29%.

Cuadro 1. Promedio de tiempo de cada actividad que compone el ciclo de cosecha por árbol.

Table 1. Average of time for each activity comprehended in the harvest cycle per tree.

Actividad	Promedio (s)	Desviación estándar (s)
Movimiento	8.48	10.49
Limpieza	9.13	6.48
Posicionamiento	3.32	1.76
Derribo	4.52	3.04
Manipulación	2.99	3.48
Descortezado y desrame	13.10	7.01
Troceo	16.79	8.31
Ciclo de cosecha	49.00	21.71

Análisis de productividad

En el Cuadro 2, la relación de productividad es mayor con el tamaño del árbol (m^3) que con el diámetro de la base en (cm), pues las R^2 son más elevadas para el primer caso. No obstante que el tiempo improductivo por jornada laboral fue mínimo, cuando la información se analizó sin considerarlo, la R^2 es mayor, por el contrario, al incluirlo, la R^2 de los modelos disminuye.

Por lo tanto, se aceptó el modelo de regresión de la forma $y = a + bx + cx^2$ para ambos casos con los TI y sin los TI (Figura 2), donde la R^2 es mayor y x equivale al tamaño del árbol (m^3); los otros tres modelos tienen un valor de R^2 bajo y no presentan una tasa decreciente en el tiempo.

Productivity analysis

Table 2 shows that the productivity relation was higher considering the size of the tree (m^3), rather than the base diameter in cm, since R^2 were the most elevated for the first case. However, unproductive time per working day was minimal, and when the information was analyzed without considering it, the R^2 was higher; in contrast, when it was considered, the R^2 of the models decreased.

Thus, the regression model $y = a + bx + cx^2$ was accepted for both cases including and discarding TI (Figure 2), where the R^2 was higher and x equaled the size of the tree (m^3). The other three models had a low R^2 value, and did not show a decreasing rate given time.

Cuadro 2. Análisis de los modelos de regresión, con y sin tiempos improductivos.

Table 2. Analysis of regression models, with and without unproductive times.

Modelos de regresión con tiempos improductivos.	
Modelo X = volumen del árbol (m^3)	R^2
$Y = 27.14x + 12.239$	0.686
$Y = -69.805x^2 + 77.26x + 4.0369$	0.7584
$Y = 35.372x^{0.4533}$	0.7416
$Y = 9.3713 \ln(x) + 32.029$	0.7438
Modelo X = diámetro de la base del árbol (cm)	R^2
$Y = 0.7813x + 0.6471$	0.5704
$Y = 0.0689x^2 + 4.5475x - 50.028$	0.647
$Y = 0.7243x^{1.0314}$	0.5844
$Y = 21.538 \ln(x) - 49.059$	0.5979
Modelos de regresión sin tiempos improductivos.	
Modelo X = volumen del árbol (m^3)	R^2
$Y = 32.03x + 12.069$	0.7366
$Y = -77.276x^2 + 87.513x + 2.9896$	0.805
$Y = 39.8x^{0.4998}$	0.7877
$Y = 11.03 \ln(x) + 35.389$	0.7943
Modelo X = diámetro de la base del árbol en (cm)	R^2
$Y = 0.9113x - 1.3326$	0.5982
$Y = -0.086x^2 + 5.6125x - 64.588$	0.6903
$Y = 0.563x^{1.1283}$	0.611
$Y = 25.167 \ln(x) - 59.457$	0.6293

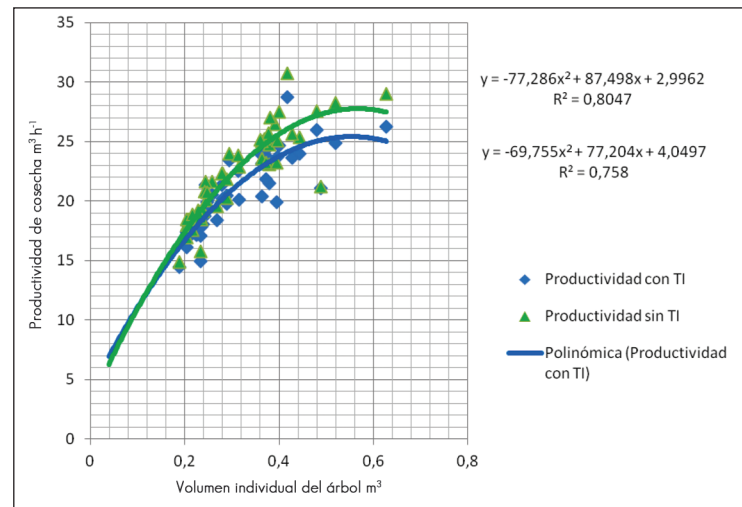


Figura 2. Modelos aceptados de productividad de la forma $y = a + bx + cx^2$.
Figure 2. Accepted models of productivity in the $y = a + bx + cx^2$ form.

En la Figura 2 se distingue que la productividad (m^3) es mayor a medida que aumenta el volumen del árbol; sin embargo, alcanza un punto en el que empieza un declive porque existe la limitante tecnológica, ya que a un cierto diámetro, por el tamaño pequeño que presenta el cabezal en comparación con el árbol, no tiene la capacidad de derribarlo y procesarlo, o el proceso es más lento.

Para conocer el máximo de volumen de arbolado del que se obtendrá la mayor productividad, se evaluaron las condiciones de primer y segundo orden. El modelo que considera TI, la máxima productividad ($25.4147 m^3 h^{-1}$) ocurrió al cortar árboles de $0.5534 m^3$, mientras que el modelo que no considera los TI tuvo una máxima productividad de 27.7661 , al cortar árboles de $0.56627 m^3$.

Al comparar con países que han realizado este tipo de estudios, para el caso de Irlanda también el tamaño del árbol afecta la productividad, de tal forma que se determinó una función de productividad en relación al tamaño de los árboles en m^3 (TA).

Productividad ($m^3 h^{-1}$ operativa) = $60.711 * TA^{0.6545}$, donde los rendimientos fueron de 13.5 a $60.5 m^3 h^{-1}$ (Jiroušek *et al.*, 2007); otro estudio realizado en Nueva Zelanda en plantaciones de pino con dos cabezales Waratah 622 y 624, obtuvieron las siguientes funciones de productividad respecto al tamaño del árbol, considerando derribo y desramado (Visser *et al.*, 2009):

Waratah 622: Productividad ($m^3 h^{-1}$ operativa) = $161 * TA^{0.39}$ [$R^2 = 0.42$]

Waratah 624: Productividad ($m^3 h^{-1}$ operativa) = $200 * TA + 35.9 * TA^2$

Figure 2 distinguishes that productivity (m^3) is higher as the volume of the tree increases. However, it reaches a turning point where it starts decreasing, because of the technological limitations; at a certain diameter, the small size of the harvester head, in comparison to the tree, does not have the capacity to down it and process it, or the process goes slower.

In order to calculate the maximum volume of trees that will allow the highest productivity, the conditions of first and second order were evaluated. The model that takes TI into consideration had a maximum productivity of $25.4147 m^3 h^{-1}$ when cutting trees of $0.5534 m^3$, whereas the model that does not consider the TI had a maximum productivity of $27.7661 m^3 h^{-1}$ when cutting trees of $0.56627 m^3$.

When results are compared to that of countries that have done this kind of research, in the case of Ireland, the size of the tree also has an impact on productivity. Therefore, a function of productivity was determined in relation to the size of trees, given in m^3 (TA).

Productivity (m^3 /operational hour) = $60.711 * TA^{0.6545}$, with a performance of 13.5 to $60.5 m^3 h^{-1}$ (Jiroušek *et al.*, 2007). Another study carried out in New Zealand in pine plantations with two Waratah 622 and 624 harvester heads, obtained the following productivity functions, depending on the size of the tree and including downing and delimbing (Visser *et al.*, 2009):

Waratah 622: Productividad ($m^3 h^{-1}$ operativa) = $161 * TA^{0.39}$ [$R^2 = 0.42$]

Waratah 624: Productividad ($m^3 h^{-1}$ operativa) = $200 * TA + 35.9 * TA^2$

Del cabezal Waratah 624, el óptimo de operación dio cuando corta árboles de 2.2 m³ de volumen individual, en un intervalo de volumen de 0.3 a 3.8 m³árbol⁻¹ (Visser *et al.*, 2009). Estos datos difieren de los de México debido a que dependen de ciertos factores como la marca de la máquina cosechadora y de las condiciones de la plantación.

CONCLUSIONES

En general, la productividad con el sistema de cosechadora forestal depende del sitio y de los factores operativos tales como: condiciones del terreno, motivación y habilidad del operador, tamaño de las ramas, diseño operativo, tamaño y forma del árbol, número de árboles comerciales y no comerciales por unidad de área, distancia de traslado, densidad de la maleza y diseño de la máquina.

Si se consideran las ocho horas programadas de cosecha, la cosechadora forestal trabaja a 75.9% de su capacidad. Del total de actividades realizadas durante el turno laboral, 53.8% pertenece a la cosecha y 21% al mantenimiento correctivo, en especial, por roturas de mangueras de aceite hidráulico. El tiempo de sustitución de las mangueras es considerable, pues no se cuenta con refacciones y la logística para conseguirlas es desorganizada.

En el proceso de cosecha se identificaron ocho tiempos improductivos ocasionados por una técnica incorrecta de cosecha del operador, lo que se puede atribuir a que no se capacitó para esta actividad.

El operador de la cosechadora no realizó el corte del arbolado en calles, sino que lo llevó a cabo de manera desordenada, lo que originó retrasos debido a la mayor cantidad de movimientos al trasladarse de un árbol a otro.

La última etapa del ciclo de procesamiento de cada árbol es el apilado, lo cual no se hizo. Las trozas se dejaron en forma desordenada y esto dificulta la extracción y el cargado de las trozas hacia las carretas.

Los modelos de regresión considerados en este estudio son válidos cuando el volumen de producción mínimo es igual o mayor a 0.0126 m³, que corresponde al volumen de una troza de 8 cm de diámetro por 2.5 m de largo. Debajo de este volumen, la productividad es igual a cero y ninguno de los modelos mencionados es válido.

Regarding the Waratah 624 harvester head, it operated optimally when cutting trees with an individual volume of 2.2 m³, ranging in volume from 0.3 to 3.8 m³/tree (Visser *et al.*, 2009). These data differ from the Mexican case because they depend on factors such as the brand of the harvester and the conditions of the plantation.

CONCLUSIONS

In general terms, the productivity of the forest harvester system depends on the site and the operational facts, such as: conditions of the land, the operator's skills and motivation, size of limbs, operational design, size and shape of the tree, number of commercial and non-commercial trees per area unit, transportation distance, density of the undergrowth and design of the machine.

If the eight programmed hours for harvesting are considered, the harvester works at 75.9% of its capacity. Of the total amount of activities performed during each working shift, 53.8% corresponds to harvesting and 21% to corrective maintenance, especially due to broken hydraulic oil hoses. The time spent changing hoses is considerable, since spare parts are not available at hand, and the logistics for getting these materials lacks organization.

During the harvesting process, eight unproductive times were identified, caused by the operator's inadequate harvesting technique. This can probably be attributed to his lack of training for this activity.

The operator of the harvester did not fell trees in roads, but did it disorderly. This caused delays, because the movements from one tree to another increased.

The last stage of the processing cycle for each tree is piling, which was not done. The logs were disorderly left on the site, which made extraction and loading in carts more difficult.

The regression models considered in this research are valid when the minimal production volume equals or exceeds 0.0126 m³, which corresponds to the volume of a log with an 8 cm diameter and a length of 2.5 m. Under this volume, productivity equals zero, and none of the mentioned models is valid.

End of the English version

REFERENCIAS

- Arranz S., C., A. Bermejo, F. Gallegos, R. Nieto, J. M. Pérez, A. J. Rodríguez, A. A. Sánchez, P. A. Tiscar y A. Tortosa. 2007. Manual de aprovechamientos forestales. Ediciones R. Nieto. Jaén, España. 424 p.
- Bigot, M. and E. Cuchet. s/f. Mechanized harvesting system for hardwoods. International Union of Forest Research Organizations. 10 p. <http://www.google.com.mx/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=OCBkQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.iufro.org%2Fdownload%2Ffile%2F1465%2F1605%2F01-harvesting-system-conf.pdf%2F&rct=j&q=Mechanized+harvesting+system+for+hardwoods&ei=y28STJOgJpDcNaIw1OML&usq=AFQjCNGZNg5OICD4Js4xuZm8IHdWxbReA> (12 de febrero de 2010)
- Brinker, R. W., J. Kinard, B. Rummer and B. Lanford. 2002. Machine rates for selected forest machines. Auburn University. Montgomery, AL USA. 32 p.
- Brizzio, J. 2009. Heavy metal rocks of Uruguay. *Forest Industries* (10): 12-15.
- Chiang, A. C. y K. Wainwright. 2006. Métodos fundamentales de economía matemática. McGraw Hill Company. México, D.F., México. 688 p.
- Cordero, R., O. Mardones y M. Marticorena. 2006. Evaluation of forestry machinery performance in harvesting operations using GPS technology. Department of Forest and Wood Science at Stellenbosch University. <http://academic.sun.ac.za/forestry/precision/papers/16.pdf> (6 de marzo de 2010).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2001. Programa estratégico forestal para México. Comisión Nacional Forestal. México, D.F. México. 1991. http://www.conafor.gob.mx/portal/docs/subsecciones/normateca/PEF_2025.pdf. (12 de febrero de 2010)
- González, R. A. s/f. Primeras jornadas del mes forestal entre ríos - Aprovechamiento de las reforestaciones. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <http://www.inta.gov.ar/concordia/info/Forestales/contenido/pdf/1986/04-1986-04.pdf> (6 de marzo de 2010)
- Hartsough, B. R. and D. J. Cooper. 1999. Cut-to-length harvesting of short rotation eucalyptus. *Forest Products Journal*. 49 (10):69-75.
- Jiroušek, R., R. Klvac and A. Skoupy. 2007. Productivity and costs of the mechanized cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *Journal of Forest Science* 53 (10): 476-482.
- Monreal R., S. 2008. Nuevas tecnologías aplicables a la cosecha de plantaciones forestales comerciales. *Revista Forestal XXI*. 11 (4):24-25.
- Nicholson, W. 2007. Teoría microeconómica: principios básicos y ampliaciones. Ed. Thomson. México, D. F., México. 671 p.
- Nieto O., R. 2010. Manual de mecanización forestal. Ediciones R. Nieto. Jaén, España. 568 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2007. Tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina y El Caribe. Estudios FAO- Montes No. 148. Roma, Italia. 178 p.
- Sánchez V., A., A. Palma T. y V. Sánchez F. 2005. La situación del subsector forestal en México ante el TLCAN; retos u oportunidades 10 años después. Reporte de Investigación 76. Universidad Autónoma Chapingo - Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CESTAAM). Texcoco, Edo. de Méx., México. 59 p.
- Sánchez V., A. y R. M. García N. 2008. La situación del subsector forestal en México ante el TLCAN; retos u oportunidades 10 años después. In: J. A. Ávila D., A. Puyana y J. Romero (Eds.). Presente y futuro de los sectores ganadero, forestal y de la pesca mexicanos en el contexto del TLCAN. El Colegio de México - Universidad Autónoma Chapingo. México, D. F., México. pp. 303-367.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2008. Acuerdo por el que se establecen las reglas de operación del Programa ProÁrbol 2009. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. 31 de diciembre de 2008. <http://www.sma.df.gob.mx/corena/descargas/proarbol/reglas2009.pdf>. (12 de febrero de 2010).
- Tolosana, E., V. González y S. Vignote. 2004. El aprovechamiento maderero. Fundación Donde del Valle de Sañazar - Mundi-Prensa. Madrid, España. 628 p.
- Varian, H. R. 1992. Análisis microeconómico. Antonio Bosch editor. Barcelona, España. 637 p.
- Visser, R., R. Spinelli, J. Saathof and S. Fairbrother. 2009. Finding the 'Sweet-spot' of mechanized felling machines. University of Canterbury. <http://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/10092/2620/1/1261746COFE%20Final%20Harvesting%20Sweet%20Spot%20Visser.pdf> (7 de marzo de 2010).



Carlos Mallén, (2010).



Carlos Mallén, (2010).



Carlos Mallén, (2010).