

Simulador de Cosecha Forestal “SimNEA”

Andrés Leszczuk¹, Eduardo Hildt^{1,2}, Francisco Somma¹, Diego Broz^{1,2}, Ignacio Capiel³, Claudio Torrubiano³ y Patricio Mac Donagh²

¹ Facultad de Ciencias Forestales (FCF, UNaM), Bertoni 124, (N3382GDD) Eldorado, Misiones, Argentina

² CONICET, Bertoni 124, (N3382GDD) Eldorado, Misiones, Argentina

³ Forestal Bosques del Plata SA

{leszczukandresalejandro,eduardohildt,franciscosomma,diegoricardobroz,patricio.macdonagh}@gmail.com

Resumen. La cosecha forestal en el NEA es realizada por contratistas altamente tecnificados que deben compensar un alto costo de inversión y operación con una alta producción. La productividad de estas máquinas está determinada por el volumen medio de los árboles cosechados y la distancia media de extracción del lote. Los estudios de tiempos y el ajuste de modelos de productividad han sido ampliamente utilizados para describir estas relaciones y predecir la productividad individual de las máquinas. Sin embargo, su utilidad como una herramienta de soporte a la decisión en el trabajo diario de los contratistas forestales es limitada. Este artículo presenta el desarrollo de un Simulador de Cosecha Forestal denominado SimNEA que integra modelos de productividad ajustados a campo y una estructura de costos adaptada a la región para determinar la producción total, el costo de cosecha y el balance entre las actividades en raleos y cortas finales.

Palabras Clave: Modelos de productividad, Herramienta de soporte a la decisión, VBA, Mediciones a campo, Explotación forestal.

1 Introducción

La cosecha de plantaciones forestales en Argentina ha pasado en la última década por un rápido proceso de mecanización, con la incorporación de maquinaria de alta complejidad tecnológica y elevada inversión inicial. Los elevados costos de operación de estos sistemas requieren de un perfecto balance entre las actividades que componen la cosecha para poder alcanzar una alta productividad, a un bajo costo de producción. Debido a que esta actividad se encuentra en su mayor parte tercerizada, la rentabilidad de los contratistas forestales está determinada por el costo al que pueden cosechar la madera, el cual, sumado al transporte, puede representar hasta el 50% de su valor puesta en la industria [1], [2].

La productividad de las máquinas forestales está fuertemente determinada por las características del bosque y el terreno en el que operan. La productividad de los equipos que realizan el corte y el trozado de los árboles (*harvesters*, *feller bunchers* y procesadores a borde de camino) está directamente relacionada al volumen individual de los árboles aprovechados [1], en tanto que la productividad de los equipos que realizan la extracción de la madera (*forwarders* y *skidders*) está relacionada con la distancia media

de extracción del lote [3], [4], [5]. La pendiente, el tipo de suelo y las características individuales de cada modelo de máquina también afectan a la productividad de la operación.

La correcta planificación de las operaciones de cosecha requiere el conocimiento previo de los cambios de productividad que sufrirá cada máquina al variar las características de la forestación intervenida. Esto permite definir la duración de los turnos de trabajo de cada equipo buscando optimizar la utilización de los recursos. El éxito de las empresas contratistas depende de su capacidad para controlar el costo de producción y planificar las actividades que conforman la cosecha [6].

Los contratistas forestales generalmente no utilizan Herramientas de Soporte a las Decisiones (DSS) en el proceso de planificación de la cosecha, necesitando realizar ajustes constantes en el número y duración de los ciclos de trabajo, creando incertidumbre en los costos y cuellos de botella en el sistema productivo. Como referencia se puede señalar que la diferencia de costos entre una operación de cosecha previamente planificada y una no planificada podría llegar al 40% [2].

Esto motiva la creación de herramientas que permitan tanto a las empresas prestadoras de servicios, empresas contratantes, y profesionales del sector, contar con información para fundamentar la toma de decisiones al momento de configurar los sistemas de cosecha que deben satisfacer las demandas de producción [7]. Los sistemas de simulación que integran modelos de productividad de la maquinaria han demostrado ser herramientas útiles para la planificación de la producción en países con mayor experiencia forestal.

Por ejemplo, el PLANFOR, desarrollado por la Universidad Austral de Chile, [6] permite la planificación de operaciones de cosecha y el cálculo de costos considerando estándares promedio de rendimiento definidos por el usuario para la productividad de cada equipo durante el año. Posibilita también la selección y asignación de máquinas para las distintas actividades que conforman la cosecha. El HSA-Model [8] es un sistema de simulación dinámica que considera el impacto que cada característica de la forestación y el terreno provocan sobre las productividades medias de los sistemas de cosecha. El PromotE [9] y el SICOFOR [7] son ejemplos de herramientas de costeo que permiten estimar el valor de una tarifa de cosecha de forma estandarizada.

Este trabajo presenta un sistema de simulación integrado de operaciones de cosecha forestal que incorpora la predicción de la productividad por medio de modelos de productividad ajustados a campo y propone un esquema de costeo adaptado a la realidad de los contratistas forestales del noreste argentino.

2 Metodología

La información necesaria para el ajuste de los modelos de productividad, utilizados por el simulador, proviene de estudios de tiempos y rendimientos realizados en operaciones de cosecha final y raleos realizados en plantaciones de *Pinus taeda* de la empresa Forestal Bosques del Plata S.A., localizada en el noreste de la provincia de Corrientes. Se evaluaron seis operaciones de cosecha realizadas por diferentes empresas contratistas, considerando tanto el corte a medida con equipos *harvester* y *forwarder* (Sistema

cut-to-length) y la extracción de árboles enteros con equipos *feller buncher*, *skidder*, procesador y cargadora a borde de camino (Sistema *full tree*). También se evaluaron operaciones de raleo con *harvester* y *forwarder*.

Las actividades realizadas por las máquinas de cosecha fueron evaluadas mediante la instalación de cámaras filmadoras a bordo y el seguimiento de sus movimientos mediante receptores GPS portátiles. La duración de cada actividad realizada, las distancias recorridas y los volúmenes de la madera elaborada fueron obtenidos de las filmaciones y los registros GPS procesados con la ayuda de un software de visualización y reconocimiento de actividades de desarrollo propio, el EsTiMa (Estudio de tiempos para maquinaria forestal). Los datos correspondientes a la superficie de los lotes, especie cosechada y tratamientos silviculturales fueron proporcionados por la empresa contratante. Para cada forestación relevada se ajustó una función hipsométrica a campo que permitió estimar la altura de los árboles cosechados a partir de su Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) medido por el cabezal cosechador y registrado en las filmaciones.

Para cada situación de trabajo relevada a campo se ajustaron diferentes modelos lineales que relacionan la productividad horaria de cada máquina con el volumen individual de los árboles cosechados y la distancia media de extracción de la parcela. La selección del mejor modelo para cada equipo se realizó considerando su simplicidad, su coeficiente de determinación (R^2), la homogeneidad y normalidad en la distribución de los residuos. Por ejemplo, para la cosecha con *harvester* se ajustaron modelos como la ec. 1:

$$PEF = b_0 + b_1 \times V + b_2 \times \ln(V) \quad (1)$$

Donde PEF es la productividad efectiva esperada para el equipo (m^3/h) cosechando árboles con un cierto volumen medio V (m^3). Los coeficientes b_0 , b_1 y b_2 son los parámetros ajustados mediante regresión lineal múltiple.

La estructura de costos utilizada por el sistema para la estimación del costo horario de operación para cada máquina fue desarrollada en base a la metodología de FAO [10] modificada para considerar las necesidades de las empresas contratistas del sector relevadas mediante encuestas, reuniones con los empresarios y datos de campo. La estructura final considera los costos fijos resultantes del capital invertido en la maquinaria y en los implementos que esta utiliza (cabezal cosechador o carreta autocargable), contemplando la opción de que la máquina o implemento haya sido adquirida mediante arrendamiento financiero o crédito bancario.

A los efectos de contemplar el impacto de las demoras provocadas por cuellos de botella en la producción, el costo de la mano de obra se consideró como salarios mensuales independientes de la producción. Los costos generados por el consumo de combustible, aceites, insumos del implemento utilizado y mantenimiento mecánico fueron considerados como costos variables por estar directamente relacionados con las horas de operación de los equipos.

La integración de la productividad de cada máquina dentro del sistema de cosecha se realizó considerando que en la región el almacenamiento de madera en el campo es inviable debido a su rápido deterioro por el ataque de hongos. De esta forma, se considera que la producción de cada actividad está condicionada por la actividad anterior y

la integración de la producción del sistema sigue la ley del mínimo, estando restringida por la actividad menos productiva. De esta manera se entiende que la producción lograda por el conjunto de equipos de cosecha siempre estará condicionada por la actividad menos productiva.

El cálculo de la producción mensual por actividad considera el número de máquinas empleadas, la productividad horaria estimada por las funciones de productividad, la eficiencia en el uso del equipo indicada por el usuario, el número de horas trabajadas por turno, el número de turnos diarios y el número de días trabajados por mes. El costo final para la cosecha ha sido calculado como el cociente entre la suma total de los costos para todos los equipos trabajando durante las horas y turnos definidos por el usuario, respecto de la producción limitante de la actividad menos productiva.

SimNEA ha sido desarrollado en Visual Basic para Aplicaciones (VBA) sobre Microsoft Excel® 2013. Esta plataforma ha sido elegida por su facilidad de adopción por parte de las empresas contratistas beneficiarias del proyecto. Los parámetros definidos en el sistema y la información ingresada por el usuario se almacenan en diferentes hojas del libro. La interface de usuario está compuesta por una cinta de opciones y un conjunto de formularios que permiten el ingreso de información y la configuración de las simulaciones. La presentación de resultados se realiza por medio de una hoja de salidas, que puede ser exportada para un análisis posterior de la información.

3 Resultados

El sistema de simulación desarrollado cuenta con cuatro módulos integrados en los que se almacenan datos y realizan procesos. En la Figura 1 se presenta la arquitectura del SimNEA.

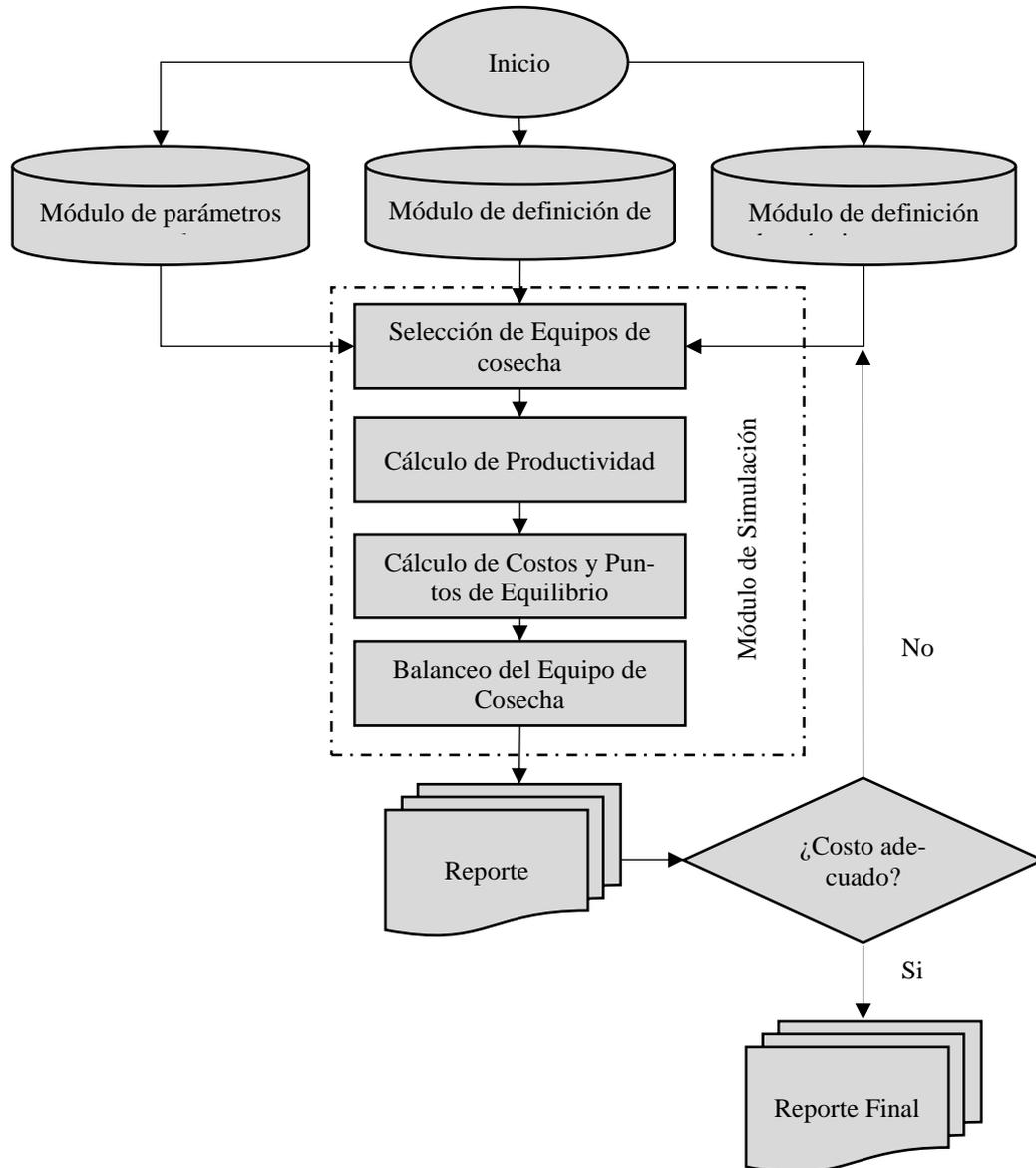


Fig. 1. Diagrama de funcionamiento del SimNEA.

A continuación, se detallan las componentes, funcionamiento e interacción de cada uno de estos componentes del sistema.

3.1 Módulo de parámetros generales

Este formulario permite que el usuario ingrese valores personalizados para la tasa de interés empleada en todos los cálculos financieros, el valor del combustible y los principales insumos considerados, la proporción de los aportes sociales respecto al sueldo básico de los operarios, el costo de la vestimenta y el equipo de protección personal entregado regularmente, el número de días trabajados por mes, el margen de ganancia esperado y el impacto del costo administrativo.

3.2 Módulo de definición de sitios

Aquí se definen y almacenan las características de los lotes sobre los que se realizarán las simulaciones. Cada sitio es identificado por un nombre único y posee una superficie, un volumen de árbol promedio, una pendiente y una distancia media de extracción determinada. También puede especificarse un porcentaje de aprovechamiento determinado y una tarifa de referencia. Cabe destacar que las variables determinadas en este módulo son utilizadas para estimar la productividad de cada máquina mediante los modelos de productividad ajustados en base a la información relevada a campo.

3.3 Módulo de definición de máquinas y costos

Este módulo permite que el usuario configure el conjunto de máquinas de las que dispone en su empresa, seleccionando y personalizando la configuración de los equipos que cuentan con un modelo de productividad relacionado. Para cada máquina deben ingresarse el valor de los ítems que integran la estructura de costos, la eficiencia y el número de horas y turnos diarios que trabajara.

3.4 Módulo de configuración del sistema y simulación

En este módulo se integran el sitio a cosechar, el sistema de cosecha utilizado y la combinación de máquinas que lo conforman. Al iniciarse la simulación el sistema utiliza los modelos de productividad almacenados para estimar la productividad que tendrá cada máquina bajo las condiciones de trabajo definidas para el sitio seleccionado. Luego se ejecuta la estructura de costos para cada equipo obteniéndose los costos horarios fijos y variables. Con esta información calcula la producción mensual potencial para cada actividad, el balance entre actividades, la producción total alcanzada, el costo de cosecha y el punto de equilibrio del sistema. Desde este módulo también pueden guardarse las salidas como un archivo *.xlsx individual

3.5 Salidas del sistema

Los reportes entregados por el simulador incluyen un resumen de las características del sitio a cosechar, y las características del sistema de cosecha utilizado: eficiencia operacional de cada equipo y cantidad de turnos y horas trabajadas. El sistema también indica la productividad efectiva de cada máquina, estimada por medio de los modelos

de productividad ajustados a campo, la productividad real de cada equipo luego de considerar su eficiencia, y la producción mensual de cada máquina trabajando con independencia de las demás. Además, se indican los costos fijos, variables y totales mensuales para cada máquina.

Al agrupar los equipos por actividad realizada permite presentar información acerca del grado de desbalance existente entre actividades y el costo total mensual de cada actividad. Finalmente, el sistema indica cual es el costo de producción bruto esperado ($\$/m^3$) considerando los costos totales de operación y la producción mensual de la actividad menos productiva. Sobre este costo bruto se adicionan los costos de administración, y el margen de ganancia previsto para estimar la tarifa del servicio. Además, se indica al usuario la producción total mensual, el número de días necesarios para completar la cosecha del lote simulado y la producción en el punto de equilibrio del sistema evaluado.

3.6 Validación y aplicabilidad del sistema

Debido a que no se cuenta con una base de información de producción y costos de situaciones de cosecha reales no fue posible hasta el momento realizar una validación formal del sistema. En talleres de capacitación y prueba realizados con los futuros usuarios del SimNEA este ha generado resultados concordantes con las productividades y costos observadas por los contratistas en sus propias operaciones.

Los resultados entregados por el sistema de simulación dependen tanto de los modelos de productividad y la estructura de costos que incorpora, como de los consumos, costos, eficiencias de uso, y tiempos de trabajo indicados por los usuarios. Si el sistema es utilizado en situaciones de trabajo similares a las observadas durante los estudios a campo (talas rasas y raleos de *Pinus spp* en el norte de Corrientes con máquinas similares a las evaluadas) el grado de ajuste de las productividades y costos predichos a la realidad dependerá de la exactitud con que se ingrese la eficiencia de uso y los ítems que conforman los costos. Si se presentan equipos o situaciones de cosecha significativamente diferentes a las relevadas hasta el momento resultaría recomendable realizar un nuevo estudio de tiempos a campo, ajustando un modelo de productividad específico que puede ser incorporado al sistema de simulación contactando a los autores.

3.7 Ejemplo de su aplicación

A continuación se presenta, como análisis de sensibilidad y ejemplo de su utilización, el resultado de la aplicación del simulador al análisis de la influencia del volumen medio de los árboles y la distancia de extracción sobre la productividad de la cosecha con *harvester* y *forwarder* considerando diferentes configuraciones de la jornada laboral.

Se configuró en el sistema un *harvester* John Deere 160 con un cabezal Waratah 414 (HV_x) y un *forwarder* John Deere 1510 (FW_x). Con estos equipos se conformaron tres esquemas de trabajo diferentes variando el número de turnos diarios asignados a cada uno (indicados en el subíndice): El esquema $HV_1 - FW_1$ con ambas máquinas trabajando

durante un turno de 9 hs por día; el esquema $Hv_1 - Fw_2$ con el *forwarder* trabajando a dos turnos por día y $Hv_2 - Fw_2$ con ambas máquinas trabajando en dos turnos.

Mediante sucesivas simulaciones se evaluó el comportamiento de estos equipos de cosecha realizando la corta final de rodales con volumen de árbol medio comprendido entre 0,2 y 0,8 m³ y distancias medias de extracción comprendidas entre 100 y 600 m.

Los siguientes gráficos presentan la evolución de la producción total mensual y el costo de elaboración para los tres equipos de cosecha evaluados.

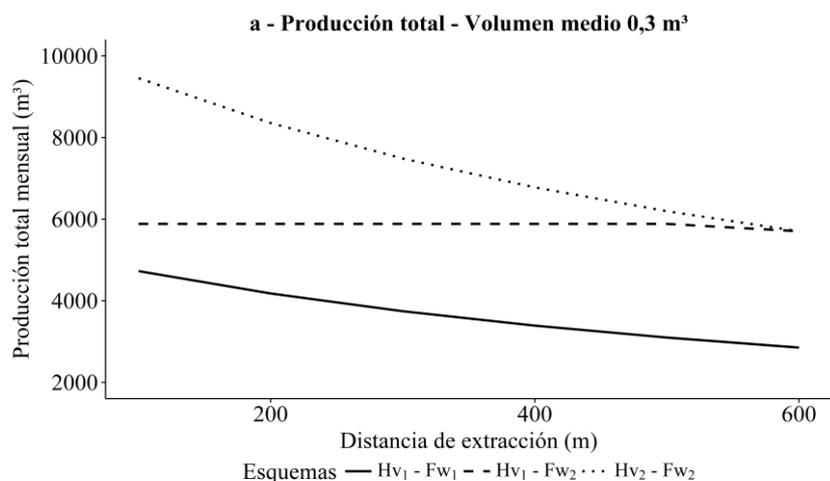


Fig. 2. Evolución de la producción total de los tres esquemas evaluados frente a cambios en la distancia media de extracción de los rodales.

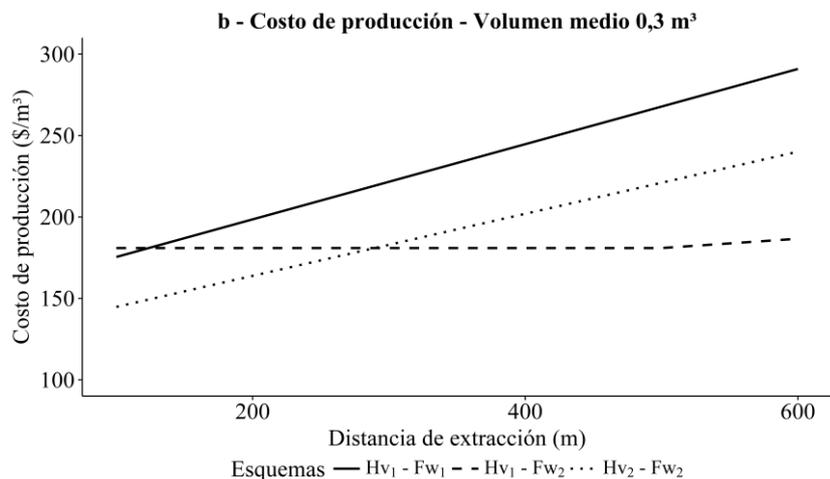


Fig. 3. Evolución del costo de elaboración para los tres esquemas evaluados frente a cambios en la distancia media de extracción de los rodales.

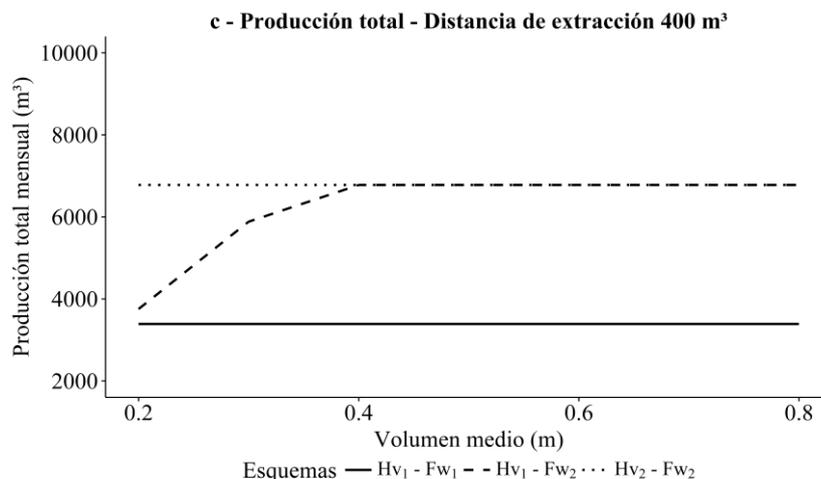


Fig. 4. Evolución de la producción total de los tres esquemas evaluados frente a cambios en el volumen medio de los árboles.

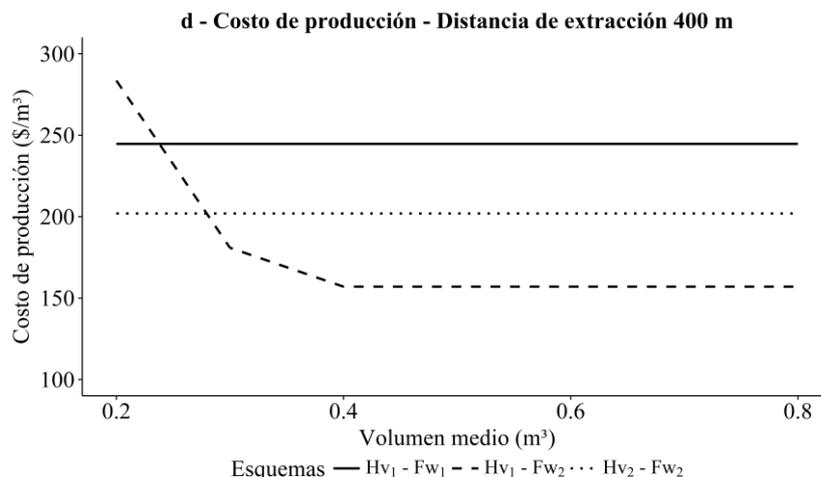


Fig. 5. Evolución del costo de la elaboración para los tres esquemas evaluados frente a cambios en el volumen medio de los árboles.

En la Figura 2 se observa que el esquema Hv₂ - Fw₂ ve reducida su producción al aumentar la distancia de extracción del rodal, superando igualmente a los demás esquemas. En el esquema Hv₁ - Fw₂ no se observa una reducción significativa de la producción debido a que la operación del *forwarder* en dos turnos evita que la extracción represente un cuello de botella en la cosecha. En la Figura 3 esto se ve reflejado en el costo unitario de producción con el sistema Hv₂ - Fw₂ presentando el menor costo a distancias cortas debido a la mayor producción de este sistema. Mientras que para distancias mayores a 300 m el mejor balance entre la productividad de cada actividad del

esquema $Hv_1 - Fw_2$ consigue reducir el costo de la cosecha e independizarlo de la distancia de extracción. En la Figura 4 se observa que el esquema $Hv_2 - Fw_2$ también presenta la mayor producción de forma constante para todos los volúmenes debido a que en este esquema la producción se ve limitada por la actividad de extracción realizada por el *forwarder* con independencia del volumen de los árboles. En el esquema $Hv_1 - Fw_2$ la producción del *harvester* resulta limitante para árboles menores a $0,4 \text{ m}^3$ mientras que para árboles mayores iguala al sistema anterior. Esto se ve reflejado en la Figura 5, donde puede observarse que el aumento del volumen de los árboles consigue una reducción de los costos únicamente en el esquema $Hv_1 - Fw_2$ hasta alcanzar el volumen para el cual la actividad de extracción resulta limitante.

4 Conclusiones

Estos resultados indican la importancia de conseguir un adecuado balance entre las actividades de corte y extracción. Este aspecto resulta muy relevante para el análisis de los sistemas de cosecha existentes en el Noreste Argentino donde las empresas contratantes fijan menores tarifas del servicio de cosecha en aquellos lotes que presentan árboles con un mayor volumen medio y para los que se espera una mayor productividad y en consecuencia un menor costo de la cosecha. Sin embargo, un ensayo de este tipo permite comprobar que la reducción en el costo de cosecha esperable al aumentar el volumen de los árboles está condicionada por la configuración del grupo de cosecha y el balance entre la producción de cada actividad.

El simulador de cosecha forestal: "SimNEA" permitirá a contratistas y empresas forestales contar con una herramienta para evaluar a priori el impacto de las decisiones tomadas en la planificación de la cosecha y la organización del trabajo sobre el costo de la cosecha, la adecuación de las tarifas y el abastecimiento industrial.

Agradecimientos: Este trabajo fue parcialmente financiado por el Proyecto PIA 14062, Plantaciones Forestales Sustentables, UCAR; y por las empresas participantes, a las cuales expresamos nuestro agradecimiento.

Referencias

1. Bramucci, M.: A identificação e quantificação dos factores que influenciam a produtividade de "Harvesters" na colheita de madeira. Tesis de Maestría, Universidad de Sao Pablo. Piracicaba. (2001)
2. Mac Donagh, P., Hildt, E., Martínez, M. S., Mulawka, J., Valdes, M., Fertil, L.: Sistema de apoyo a la planificación de la cosecha forestal. In acta. XVI Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Eldorado. Misiones. Argentina. (2005)
3. Manner, J., Palmroth, L., Nordfjell, T., Lindroos, O.: Load Level forwarding work element analysis based on automatic follow-up data. *Silva Fennica* Vol. 50, no. 3 Article Id 1546. (2016)

4. Manner, J. Automatic and Experimental Methods to Studying Forwarding Work. Doctoral Thesis, Faculty of Forest Sciences. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Biomaterials and Technology. Umea. (2015)
5. Malinovski, R., A., Fenner P., T., Schack-Kirchner, H., Malinovski, J., R., Malinovski R. A.: Otimização da distância de extração de madeira com forwarder. *Scientia Forestalis Piracicaba* v.36, n.39, p. 171-179. (2008)
6. Carey, P.: Metodología y diseño de un sistema de apoyo en la planificación de operaciones forestales. *Bosque* no. 18, vol. 1. 83-88. (1997)
7. Acuña, E., Drake, F., Garcias, M.: Una aplicación de apoyo a la toma de decisiones para el costeo de maquinarias de cosecha forestal. *Revista Árvore, Viçosa-MG*, v.35, n.1, 165-172. (2011)
8. McDonagh, K.: Systems Dynamics Simulation to Improve Timber Harvesting System Management. Thesis of Master of Science in Forestry, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University. (2002)
9. Mikkonen, E., Lan, Z.: Cost and Production Modeling Tool for Wood Procurement Logistics. *Meh. Sumar. 2001-2004, Special Issue of the Journal Nova*. Vol. 26. (2005)
10. Ackerman, P., Belbo, H., Eliasson, L., de Jong, A., Lazdins, A., Lyons, J.: The COST model for calculation of forest operations costs. *International Journal of Forest Engineering*. Vol. 25 No.1, 75-81. (2014)