

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

Optimización del componente forestal del programa nacional de  
fomento de sistemas silvopastoriles carbono-neutral

**2020-2021**

Ing. Olman Murillo Gamboa (coordinador), Ph.D.

Ing. Yorleny Badilla Valverde, Ph.D.

**Marzo , 2023**

## Tabla de contenido

2. Centro funcional 1401 092.....	3
3. Autores y dirección: .....	3
Resumen .....	3
Abstract.....	3
Principales logros e indicadores de impacto/adopción del proyecto .....	4
Introducción.....	4
Metodología.....	5
Objetivo Especifico 1: FONAFIFO, Consolidar un modelo innovador de financiamiento (crédito + PSA), del componente forestal y otras necesidades conexas de la finca ganadera (cercas, fertilizantes, otros).....	6
1. Ospino, M., Badilla, Y., Paniagua, W., Campos, C., Murillo, O. 2020. Costos de producción de teca ( <i>Tectona grandis</i> ) y melina ( <i>Gmelina arborea</i> ) en sistemas silvopastoriles de la zona norte de Costa Rica. <i>Agronomía Costarricense</i> 44(2): 155-173. <a href="http://dx.doi.org/10.15517/rac.v44i2.43109">http://dx.doi.org/10.15517/rac.v44i2.43109</a> .....	8
2. Ospino, M., Murillo, O., & Alfaro, M. (2022). Análisis financiero y de escenarios de financiamiento del componente forestal en sistemas silvopastoriles. <i>Revista Forestal Mesoamericana Kurú</i> , 19(45). <a href="https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i45.6323">https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i45.6323</a> .....	23
3. Modelo de costos por árbol para el cultivo de madera de teca ( <i>Tectona grandis</i> Linn f) en sistemas silvopastoriles. ....	33
Objetivo Especifico 2: CORFOGA, Consolidar un programa nacional de fomento y asistencia técnica a ganaderos para su conversión en SSP .....	66
Árboles en franja para fincas ganaderas.....	70
Objetivo Especifico 3: TEC, Optimizar la productividad del componente forestal de los SSP. ....	88
1. Tesis desarrolladas con el aporte total o parcial del proyecto.....	88
2. Crecimiento esperado, ingreso económico y carbono fijado con la siembra de árboles en franjas en la zona norte de Costa Rica. ....	89
3. Efecto del espaciamiento en el desarrollo de la teca en sistema silvopastoril en franjas, San Carlos, Costa Rica .....	97
Conclusiones generales .....	111
Recomendaciones generales .....	111
Agradecimientos .....	112
Referencias .....	112

## 2. Centro funcional 1401 092

### 3. Autores y dirección:

Ing. Olman Murillo Gamboa (coordinador), Ph.D. [omurillo@itcr.ac.cr](mailto:omurillo@itcr.ac.cr) (Ing. Forestal)

Ing. Yorleny Badilla Valverde, Ph.D. [ybadilla@itcr.ac.cr](mailto:ybadilla@itcr.ac.cr) (Ing. Forestal)

### Resumen

El sector ganadero a nivel mundial representa una de las actividades con mayor impacto en la sostenibilidad del sector alimenticio, dada su importancia se han creado diferentes iniciativas que impulsan las prácticas de una ganadería sostenible. En América Latina la ganadería es la actividad de mayor uso de la tierra, con más de un 43% en Costa Rica, en regiones con los indicadores más bajos de desarrollo humano y con serias limitaciones de sostenibilidad. Los sistemas silvopastoriles (SSP) ofrecen la oportunidad de integrar la actividad ganadera con la actividad forestal, con el fin de contribuir a lograr la carbono neutralidad de la ganadería y a generar nuevos ingresos en las fincas. Esta investigación tuvo como objetivo poner en marcha un programa nacional permanente y sostenible de conversión de fincas ganaderas en sistemas silvopastoriles carbono-neutrales. El proyecto fomentó un novedoso sistema silvopastoril que permite plantar una alta densidad de árboles en franjas de 6m de ancho (90 a 125 árboles cada 100 m de franja). Se generó un nuevo modelo de costos y financiero del componente forestal con indicadores muy positivos. La producción de teca durante un ciclo completo de 16 años en este SSP tiene un costo por árbol de ₡3 178 (\$5,16) para el diseño SSP 1 y ₡2 990 (\$4,82) para diseño SSP 2. El mejor escenario se obtuvo con aporte de capital propio, venta de madera internacional y aporte del Pago por Servicios Ambientales del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), que genera un VAN de \$21 536, una R(B/C) de 3,74 y una TIRM de 18,4%. Con actividades de fomento se plantaron fincas ganaderas líder en el Pacífico sur y Pacífico norte en coordinación con el FONAFIFO, Corporación de Fomento Ganadero (CORFOGA) y 30 fincas en Los Chiles, Guatuso y San Carlos en vinculación con Fundación Banco Ambiental (FUNBAM). Se dio asistencia técnica a los finqueros, se registró datos de crecimiento y comportamiento general con teca, melina, acacia mangium, pílón y laurel. Se elaboró un manual técnico, se impartieron charlas presenciales y conferencias virtuales y una Webinar internacional. Se elaboraron 6 artículos científicos (2 publicados y 2 en prensa). Se participó como representantes del sector forestal, junto con CORFOGA, en la elaboración de la nueva norma CORFOGA-INTECO/DN 11:2022 “Producción de carne bovina en sistemas en pastoreo y libre de deforestación”, como requisito para la apertura de exportación de carne bovina a la Unión Europea.

**Palabras clave:** silvopastoril, agroforestería, ganadería, plantaciones forestales

### Abstract

The livestock sector worldwide represents one of the activities with the greatest impact on the sustainability of the food sector; given its importance, different initiatives have been created to promote sustainable livestock practices. In Latin America, livestock farming is the activity with the highest land use, with more than 43% in Costa Rica, in regions with the lowest human development indicators and with serious limitations for its sustainability. Silvopastoral systems (SSP) offer the opportunity to integrate livestock and forestry activities in order to contribute to achieving carbon neutrality in livestock farming and to generate new income on farms. The

objective of this research was to implement a permanent and sustainable national program for the conversion of cattle farms to carbon-neutral silvopastoral systems. The project promoted an innovative silvopastoral system that allows a high density of trees to be planted in 6 m wide strips (90 to 125 trees per 100 m strip). A new cost and financial model for the forestry component was generated with positive indicators. Teak production during a full 16-year cycle in this SSP has a cost per tree of ₡3 178 (\$5.16) for SSP design 1 and ₡2 990 (\$4.82) for SSP design 2. The best scenario was obtained with own capital contribution, international timber sales and Environmental Services Payment contribution from the Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), which generates an NPV of \$21,536, an R(B/C) of 3.74 and an IRRM of 18.4%. In coordination with FONAFIFO, Corporación de Fomento Ganadero (CORFOGA) and Fundación Banco Ambiental (FUNBAM), leading livestock farms were planted in the south Pacific, north Pacific, and 30 farms in Los Chiles, Guatuso and San Carlos northern zone. Technical assistance was provided to farmers, and growth and general behavior data was recorded for teak, melina, acacia mangium, pilon and laurel. A technical manual was prepared, face-to-face lectures and virtual conferences were given and an international Webinar was held. We participate as representatives of the forestry sector, together with CORFOGA, in the formulation and approval of the new CORFOGA-INTECO/DN 11:2022 standard "Beef production in grazing systems free of deforestation", as a requirement for the opening of beef exports to the European Union.

**Key words:** silvopastoral, agroforestry, livestock, forestry, plantations

### **Principales logros e indicadores de impacto/adopción del proyecto**

- a) Diseño propio validado de SSP en franjas con 90 y 125 árboles/100m.
- b) Modelo de costos y financiero consolidado
- c) Plantación de 35 SSP en fincas de pequeños y medianos productores en el Pacífico Sur, Norte y Zona Norte (Los Chiles, Guatuso y San Carlos).
- d) Manual técnico y 6 publicaciones científicas
- e) Participación en elaboración y aprobación nueva norma técnica CORFOGA-INTECO/DN 11:2022 "Producción de carne bovina en sistemas en pastoreo y libre de deforestación", como requisito para la apertura de exportación de carne bovina a la Unión Europea.

### **Introducción**

La ganadería a nivel mundial representa una de las actividades con capacidad de proporcionar alrededor del 34% del suministro mundial de proteínas alimentarias (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2022). El sector ganadero genera una influencia positiva sobre la sostenibilidad del sector alimentario regional, lo que ha incentivado la creación del Programa Mundial para una Ganadería Sostenible de la FAO (2014), conocido como NAMA Ganadería (MAG et al., 2017). En relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la ganadería sostenible prioriza en 5 de los 17 ODS, dentro de

los cuales se encuentra “Acción por el Clima” (ODS 13) (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2016).

Los sistemas silvopastoriles relacionan el componente forrajero, el elemento forestal y la actividad ganadera (Murillo et al., 2013). A pesar de los beneficios ambientales de los árboles al SSP, su introducción y cultivo dentro del sistema ganadero carece de información esencial para su fomento (Murgueitio & Ibrahim, 2004). Dada la magnitud de la actividad ganadera en el país, más del 43% del territorio nacional en aproximadamente 37 171 fincas (VI Censo Nacional Agropecuario INEC 2015), se abre una oportunidad para la producción de madera de alto valor, asociado a la actividad ganadera. Lo que vendría a contribuir a resolver buena parte de las debilidades socioeconómicas y ambientales del sector ganadero, así como al faltante de abastecimiento de madera para el país. Con el apoyo técnico de la Corporación de Fomento Ganadero (CORFOGA) y del Tecnológico de Costa Rica, junto con el apoyo financiero de Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), se puso en marcha nuevos diseños de SSP que permiten producir madera, incorporar sombra para el ganado y mejorar la producción ganadera en general en la región (Murillo et al., 2015). Sin duda, el proyecto logró contribuir significativamente con el objetivo general, de poner en marcha un programa nacional de conversión de fincas ganaderas en sistemas silvopastoriles. Las instituciones estatales correspondientes, gremiales y la academia, deberán continuar fomentando el desarrollo de los SSP. Su impacto socio-económico en las zonas rurales y en la carbono neutralidad del país, sin duda serían de alto impacto. Con el desarrollo de este proyecto, las condiciones para el fomento de estos diseños de SSP quedaron creadas, buena parte de los faltantes de conocimiento fueron resueltos, aunque la investigación debe continuar optimizando el modelo.

## **Metodología**

El proyecto tuvo como objetivo general poner en marcha un programa nacional permanente y sostenible de conversión de fincas ganaderas en sistemas silvopastoriles carbono-neutrales. Para lo cual concentró su aporte en la consolidación de información técnica faltante sobre costos, financiamiento y crecimiento en general, así como en mejorar la coordinación entre las dos instituciones clave, el FONAFIFO y CORFOGA. A pesar de que este fue un proyecto diseñado como de investigación, tuvo un componente y un objetivo específico enteramente dedicado a la transferencia, divulgación y vinculación con el sector.

Finalmente, se participó activamente como representantes del sector forestal, en la construcción de la nueva norma CORFOGA-INTECO/DN 11:2022 “Producción de carne bovina en sistemas en pastoreo y libre de deforestación”, como requisito para la apertura de exportación de carne bovina a la Unión Europea. Esta nueva norma fue requisito fundamental solicitado por la Unión Europea para la apertura de su mercado. Con lo cual, el sector ganadero tendrá que ir migrando poco a poco hacia sistemas SSP sustentables y de baja o nula huella de carbono, tal y como se trabajó en estos años con estos nuevos diseños de SSP, donde el TEC asume el liderazgo en el componente forestal.

**Objetivo Específico 1:** FONAFIFO, Consolidar un modelo innovador de financiamiento (crédito + PSA), del componente forestal y otras necesidades conexas de la finca ganadera (cercas, fertilizantes, otros).

Para el cumplimiento de este objetivo se realizó un trabajo conjunto con el FONAFIFO, donde se desarrolló un modelo de costos y luego, un análisis financiero exhaustivo, donde se revisaron varios escenarios de financiamiento (Con y sin PSA, sensibilidad, entre otros). Los datos de costos fueron validados con base en las mediciones de campo desarrolladas en este proyecto y provenientes de estudios similares sobre costos recientes de plantaciones forestales (Vallejos 2019). Este trabajo había dado inicio como parte de una tesis de licenciatura forestal de la UNA (Ospino 2018), sin embargo, los trabajos de análisis y escritura final de las publicaciones continuaron, se mejoraron y se lograron publicar formalmente durante este proyecto.

Posteriormente, una nueva tesis de maestría académica del TEC revisó completamente la información generada, produjo un nuevo modelo mejorado de costos innovador, basado en el árbol individual. Logró mejorar detalles del diseño técnico y realizar una mejor estimación de costos de producción. Finalmente se realizó de nuevo los análisis financieros respectivos con los escenarios de financiamiento de SSP para el FONAFIFO.

Es importante mencionar que para desarrollar los modelos de costos y de análisis financiero, se utilizó como base los nuevos diseños mejorados de SSP consolidados durante este proyecto, basados en franjas de 6m de ancho, donde se pueden albergar entre 90 árboles cada 100 m de franja (diseño 2) y 125 (diseño 1).

De este primer objetivo se generaron 2 artículos ya publicados y 2 nuevos artículos recién sometidos a revistas indexadas:

1. Ospino, M., Badilla, Y., Paniagua, W., Campos, C., Murillo, O. 2020. Costos de producción de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en sistemas silvopastoriles de la zona

norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 44(2): 155-173.  
<http://dx.doi.org/10.15517/rac.v44i2.43109>

2. Ospino, M., Murillo, O., & Alfaro, M. (2022). Análisis financiero y de escenarios de financiamiento del componente forestal en sistemas silvopastoriles. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 19(45). <https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i45.6323>

3. Jiménez, J., Murillo, O., Badilla, Y. En prensa. Modelo de costos por árbol para el cultivo de madera de teca (*Tectona grandis*) en sistemas silvopastoriles. *Revista Tec Empresarial*.

4. Jiménez, J., Salas, C., Murillo, O., Badilla, Y. En prensa. Análisis financiero para el cultivo de teca (*Tectona grandis* L.f.) en sistema silvopastoril.

1. Ospino, M., Badilla, Y., Paniagua, W., Campos, C., Murillo, O. 2020. Costos de producción de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en sistemas silvopastoriles de la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 44(2): 155-173. <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v44i2.43109>

Agronomía Costarricense 44(2): 155-173.

ISSN:0377-9424 / 2020 [www.mag.go.cr/rev\\_agr/index.html](http://www.mag.go.cr/rev_agr/index.html) [www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)

Nota técnica

**COSTOS DE PRODUCCIÓN DE TECA (*Tectona grandis*) Y MELINA (*Gmelina arborea*) EN SISTEMAS SILVOPASTORILES DE LA ZONA NORTE DE COSTA RICA**

Mónica Ospino-Araya<sup>1</sup>, Yorlenny Badilla-Valverde<sup>2</sup>, Wilfrido Paniagua-Madrigal<sup>3</sup>, Carlos Campos-Granados<sup>4</sup>, Olman Murillo-Gamboa<sup>5</sup>/\*

**Palabras clave:** Economía forestal; ganadería; plantaciones forestales; sistemas agroforestales.  
**Keywords:** Forest economy; livestock; forestry plantations; agroforestry systems.

**RESUMEN**

**Introducción.** La ausencia de información económica constituye una barrera para el fomento de sistemas silvopastoriles. El componente forestal representa una contribución marginal en la economía de la ganadería, que mantiene una huella de carbono alta y ocupa un 43% del territorio. Se requiere un nuevo modelo silvopastoril de mayor impacto económico-social y ambiental. **Objetivo.** Generar información de costos del cultivo de árboles, en un diseño silvopastoril que logra integrar el negocio pecuario con el de madera. **Materiales y métodos.** Se reporta la estructura completa de costos del componente forestal, basado en clones de melina y teca. Se adaptó la información de plantaciones compactas ordinarias, a un sistema de cultivo de árboles en franjas dentro de una finca ganadera, utilizado en la zona norte de Costa Rica. La información se diferenció en dos escenarios, el modelo de alta y baja inversión, según el paquete tecnológico utilizado. **Resultados.** Los árboles se plantaron

dentro de franjas cercadas de seis metros de ancho.ha<sup>-1</sup> en los linderos de los apartos, en distribución tresbolillo a 2,5 m entre hileras y 4,0 m entre árboles, que permiten cultivar 150 árboles en dos franjas.ha<sup>-1</sup>, en un ciclo de 8 años para melina y de 16 años para teca. **Conclusiones.** El costo total de cultivar melina en dos franjas.ha<sup>-1</sup>, en el modelo de alta inversión, fue de ₡751 759 (US \$1307) y de ₡966 818 (US \$1681) con teca. En el modelo de baja inversión el costo total para melina fue de ₡545 739 (US \$949) y para teca ₡714 548 (US \$1242). La mano de obra representó 41% de los costos totales en melina y 44% en teca. Este diseño silvopastoril requiere plantar 4,17 ha con melina y 5,5 ha con teca para obtener la misma cantidad de madera que en una plantación convencional.

**ABSTRACT**

**Production costs of teak (*Tectona grandis*) and melina (*Gmelina arborea*) in silvopastoral systems in the northern region of Costa Rica.**



**Introduction.** The absence of economic information constitutes a barrier to the promotion of silvopastoral systems. The forest component represents a marginal contribution to the livestock economy, which maintains a high carbon footprint and occupies 43% of the territory. A new silvopastoral model of greater economic, social and environmental impact is required. **Objective.** To generate information on the costs of tree cultivation, in a silvopastoral design that manages to integrate the livestock business with that of wood. **Materials and methods.** The complete cost structure of the forest component is reported, based on melina and teak clones. The information from ordinary compact plantations was adapted to a strip tree cultivation system within a cattle farm, utilized in the northern region of Costa Rica. The information was differentiated in two scenarios, the high and low investment model, according to the technological package used. **Results.** The trees were planted within two fenced-strips of six meters wide per hectare at the boundaries of the grazing paddocks. Within the strips, trees were planted in an irregular distribution, at a distance of 2,5 m between rows and 4.0 m between trees, which allowed planting of 150 trees.ha<sup>-1</sup> in a cycle of 8 years for melina and 16 years for teak. **Conclusions.** Total cost of growing melina in 2 strips.ha<sup>-1</sup>, in the high investment model was ₡751 759 (US \$1307) and ₡966 818 (US \$1681) for teak. In the low investment model, the total cost for melina was ₡545 739 (US \$949) and ₡714 548 (US \$1242) for teak. Labor represented 41% of the total costs in melina and 44% in teak. This silvopastoral design requires planting of 4.17 ha with melina and 5.5 ha with teak in order to obtain the same amount of wood as in a conventional plantation.

## INTRODUCCIÓN

La ganadería en Costa Rica es una actividad productiva tradicional que se desarrolla aproximadamente hace 450 años (CORFOGA 2015). Cerca de un 43% (1,85 millones ha) del territorio corresponde a tierras ocupadas por pastos (INEC 2015). Sin embargo, la mayor parte de estas áreas son utilizadas para desarrollar sistemas de ganadería extensiva, con baja tecnología, que provocan un deterioro ambiental y una mayor emisión de gases de efecto

invernadero (GEI), que contribuyen al calentamiento global (FAO 2013).

El país tiene como meta alcanzar descarbonizar la economía, por lo que todos los sectores deben aportar a esta causa desde sus posibilidades y realidad socioeconómica. Por ser la ganadería el uso del suelo de mayor superficie en el territorio nacional, su impacto ambiental es de suma relevancia. Debe, por tanto, buscarse soluciones e invertir en la mejora de los sistemas de producción, con el fin de poner en marcha opciones que reduzcan emisiones y aumenten su rentabilidad, tal y como se establece en el NAMA ganadería (MAG/CORFOGA/INTA/CNPL/PNUD 2017).

Los sistemas silvopastoriles (SSP) asocian el componente forestal, el forrajero y la producción de carne o leche (Murillo et al. 2013). Han sido promovidos durante décadas y un abundante conocimiento se ha generado al respecto (Ibrahim et al. 2007, Casasola et al. 2009). Sin embargo, en el medio costarricense no ha ocurrido una verdadera integración entre el componente forestal y el ganadero. Es común encontrar modalidades de SSP en fincas ganaderas con árboles en hileras o linderos, cortinas rompevientos y árboles dispersos en potrero (Villanueva et al. 2010), donde los árboles tradicionalmente no contribuyen con la economía de la finca, sino solamente en sus aspectos ambientales (Murgueitio e Ibrahim 2008). El componente forestal del modelo silvopastoril propuesto por Murillo et al. (2015b), consiste en un diseño que permite la inclusión de árboles en franjas de especies forestales de alto valor, intercaladas dentro de la unidad de producción pecuaria. Cuyo propósito es desarrollar un sistema, que logre armonizar el negocio pecuario junto con el de madera de alto valor y a la vez, aumentar la compensación de las emisiones de gases efecto invernadero.

La información financiera y de estructura de costos es fundamental para lograr el desarrollo de propuestas que fomenten cualquier actividad productiva. El desarrollo de un modelo de costos real permitirá fomentar el establecimiento de SSP de mayor adopción por parte del sector ganadero. Contribuirá a que el país alcance a largo plazo una transformación hacia un paisaje rural sostenible (Murgueitio 2009). El Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) que ha

desarrollado esquemas de crédito específicos, para promover modalidades de cultivo de árboles maderables en sistemas agroforestales y silvopastoriles (FONAFIFO 2019), aunque adolece de información certera sobre costos e ingresos, que permitan mejorar el diseño de sus productos de crédito. Este estudio aporta el primer modelo de costos completo del componente forestal de un nuevo enfoque SSP para el país y tuvo el propósito de generar información técnica de utilidad para el FONAFIFO y para el sector ganadero y forestal en general. El modelo de costos fue diseñado con la intención de extender su aplicabilidad a la gran mayoría de escenarios existentes. Por esta razón, separa la modalidad para pequeños y medianos productores de la de grandes ganaderos (> 50 ha). Asimismo, se separa el modelo para el cultivo de la teca (ciclo largo de 16 años) del de la melina (ciclo corto de 8 años), por ser las 2 especies más plantadas en la región tropical. Por tanto, en la construcción del nuevo modelo SSP, no se pretende comparar entre estos escenarios, dada su naturaleza y oportunidad de fomento diferente. De esta manera, se espera, que esta base de datos de costos sistematizada, logre su objetivo de aplicabilidad en la gran mayoría de opciones de cultivo de madera en fincas ganaderas del país

## MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo silvopastoril base, utilizado en esta investigación, se apoyó en las experiencias generadas desde el 2015 en fincas en la región de Florencia de San Carlos, Zona Norte de Costa Rica (Paniagua et al. 2015, Murillo et al. 2015b). El modelo se estableció en las fincas experimentales del Colegio Agropecuario de San Carlos (Santa Clara) y en la finca La Vega del Instituto Tecnológico de Costa Rica. La región es una zona baja, de una altitud entre 200 y 225 msnm, de topografía plana a levemente ondulada, suelos inceptisoles, arcillosos, poco profundos y sumamente ácidos ( $\text{pH} < 5,5$ ), con una precipitación anual entre 3000 y 3300  $\text{mm.año}^{-1}$ , con los meses de febrero a abril relativamente secos, pero sin llegar a manifestar déficit hídrico, y una temperatura promedio entre 25 a 28°C (Filomeno 2018). El sistema silvopastoril activo en la región se basa en la incorporación de árboles

en 2 franjas.ha-1 cercadas y de 6 m de ancho, se aprovecharon todo tipo de linderos dentro de la finca ganadera. El modelo de costos fue adaptado a la unidad de una hectárea para efectos de comparación y de establecer una misma unidad de análisis de fácil comparación. En la modalidad más intensiva, las franjas se establecen cada 50 m, preferiblemente con una dirección este-oeste para reducir sombrío fuera de las franjas. Con este arreglo espacial, se pueden establecer 2 franjas de 600  $\text{m}^2$  cada una por ha (6 m de ancho por 100 m de longitud), para un total de 1200  $\text{m}^2$  o también, 12% de la superficie de una hectárea bajo producción de madera. El diseño establece que dentro de cada franja se plantan 3 hileras de árboles en distribución “tresbolillo o pata de gallo”, separadas por 2,5 m entre hileras y, dentro de cada hilera, los árboles se plantan cada 4 m. Esto da como resultado 3 hileras internas por franja, con un espaciamiento de 2,5 m x 4 m, que permiten albergar un total de 75 árboles.franja-1, o también, 150 árboles.ha-1 en producción de madera (Figura 1).

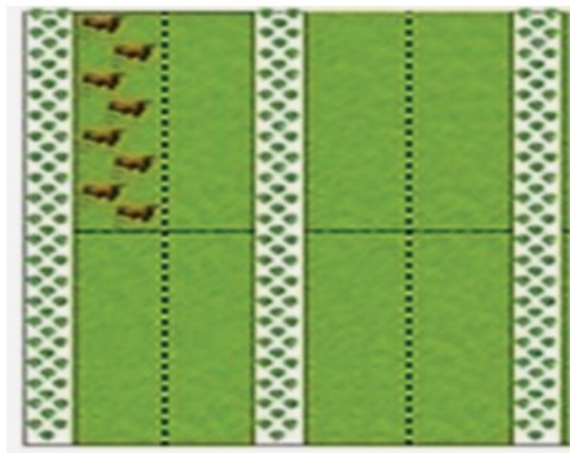


Figura 1. Opciones de establecimiento de sistemas silvopastoriles con franjas de madera (Paniagua et al. 2015).

Se seleccionaron las especies melina (*Gmelina arborea* Roxb.) y teca (*Tectona grandis* L.f.), por ser las de mayor tasa de plantación y mercado de madera en el país y, con el paquete tecnológico de mayor evolución y desarrollo, basado en el uso de clones de alto rendimiento (Murillo y Badilla 2015).

El estudio se basó en el sistema de costos

para plantaciones forestales en Costa Rica, propuesto por el equipo de investigación en plantaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica (Murillo et al. 2015a) y mejorado en el trabajo de Vallejos (2019). Los datos de costos y rendimientos, de todas las labores de manejo de plantaciones, fueron compilados durante más de 10 años a partir de datos reales registrados en empresas reforestadoras costarricenses. La información fue sistematizada, unificada y promediada en un mismo orden para cada actividad y año de trabajo en plantaciones forestales. La mayor parte de los datos de rendimiento fueron determinados en trabajo de muestreo en campo, con base en el método de tiempos y movimientos, que registra valores de producción por unidad de tiempo, repetido a distintas horas del día y distintos días de la semana (Guevara 2007, Guevara y Murillo 2009). De este modelo base, se adaptó la información para el establecimiento y manejo de árboles en franjas de espaciamiento reducido. Se tomaron como experiencia los costos reales del establecimiento y mantenimiento de árboles en franjas en sistemas

ganaderos, establecidos en fincas en la zona norte del país en los últimos 5 años (Paniagua et al. 2015). Los precios, de todos los insumos y de los costos de preparación de suelos, se actualizaron con base en consulta en almacenes y comercio regional especializado. La base de datos se construyó en colones, en donde se organizó cronológicamente, año con año, cada actividad que ocurre en un ciclo completo de producción de madera de melina y teca dentro del SSP.

El modelo de costos se diferenció entre alta y baja inversión de tecnología (Tabla 1), que coincide en buena parte con el concepto de pequeño (< 20 ha), mediano (< 50 ha) y gran productor (> 50ha) utilizado por el Fondo de Financiamiento Forestal en el país (Murillo y Badilla 2015). Ambas modalidades se diferencian en que en el paquete tecnológico de alta inversión (MAI) aplica mayor tecnología en la preparación y manejo del suelo, y en la aplicación de agroquímicos.

Tabla 1. Definición de los modelos silvopastoriles de alta y baja inversión.

Modalidad	Características
Alta inversión (MAI)	Propiedades de > 50 ha. Incluye preparación mecanizada del terreno, enmiendas, fertilización y utiliza cerca eléctrica.
Baja inversión (MBI)	Fincas < 50 ha, no hay preparación mecanizada del terreno, pobre manejo del suelo y utiliza cercas vivas.

El sistema de plantación forestal del país incluye la figura del ingeniero forestal regente, acorde con la normativa costarricense. Sus labores incluyen la gestión y supervisión de todas las actividades, desde el planeamiento, diseño y establecimiento del sistema de franjas de madera. Así como las gestiones ante el Fondo de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) para la obtención del crédito forestal y el Pago por Servicios Ambientales.

En el caso del MAI, el costo del jornal se determinó mediante el monto oficial que establece el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social en el

segundo semestre (2016), con un valor de ₡9711 para una persona peona agrícola que realiza labores de campo (6 horas.día<sup>-1</sup>). Sin embargo, se le debe añadir un 45% (₡4437) correspondiente a las cargas sociales, que suma un costo total por jornal de ₡14 148 (US \$24,6, a tasa de cambio de 1 US \$ = ₡575, junio 2017).

**MBI.** En el caso de pequeñas personas productoras, parte importante de la mano de obra es aportada por la familia dueña de la propiedad, además de la contratación de personas trabajadoras ocasionales y no se utiliza la declaración de una planilla de trabajo ni un pago de la seguridad social. En concordancia con la

normativa nacional sobre seguridad laboral del trabajador y la trabajadora, al costo del jornal se le añadió el pago del seguro voluntario de la persona trabajadora independiente que tiene definida la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS), determinado para el II semestre 2016 en Costa Rica en ₡25 647, tal y como lo proponen Murillo et al. (2017). Para su estimación en el costo del jornal, se asumió que una persona que labora ocasionalmente logra ocuparse en promedio 20 días.mes<sup>-1</sup>, que resultó en un valor diario de ₡1282. Por tanto, el costo del jornal se determinó mediante el mismo valor oficial del jornal mencionado anteriormente (₡9771) más ₡1282 de la CCSS, para un total de ₡11 053,71. Este costo total por jornal asume entonces que la persona trabajadora con ese dinero podrá pagar en forma voluntaria el costo de su seguridad social. Finalmente, se le agrega el pago de una póliza de riesgos laborales, que es obligatoria en la legislación nacional y corresponde a un 3% del salario. De tal manera, que el costo final del jornal de la persona peona agrícola ocasional para el modelo fue de ₡11 385 (US \$19,8).

El diseño del SSP planteado asume técnicamente el no ingreso de los animales dentro de las franjas, en ningún momento durante todo el ciclo de producción, tema que podrá ser sujeto de discusiones a futuro. Es requerido proteger a los árboles dentro de la franja por medio de cercas eléctricas o cerca viva, con el respectivo costo de mantenimiento de la cerca durante todo el ciclo de producción (Méndez et al. 2000). Para el modelo de alta inversión, se seleccionó la opción de cerca móvil, que permite su movilidad y retiro con

facilidad, para facilitar la corta y extracción de árboles durante los raleos o en la cosecha final.

Los componentes e insumos necesarios para el establecimiento de las cercas incluyen los costos del equipo eléctrico como fuente de poder, la toma de tierra, el aislador, el alambre y los postes. Se incluyeron costos de los materiales necesarios para establecer las cercas alrededor de las 2 franjas, cada una con una longitud de 100 m y con 6 m de ancho en una hectárea de terreno.

La depreciación del equipo e insumos de la cerca se estimó por el método de la línea recta, que se obtuvo mediante el cociente entre el costo total de cada insumo y sus años de vida útil. El valor resultante se prorrateó (se distribuyó equitativamente) entre la cantidad de hectáreas del MAI y el MBI. Para efectos del impulsor de 80 millas y panel solar, se utilizó una vida útil de 8 y 16 años, respectivamente, que corresponden con el ciclo de producción de la melina y la teca

## RESULTADOS

En la Tabla 2, se muestran los costos de establecimiento del componente forestal del sistema en el año cero, o también costos de preinversión. Para el MAI, se establece una cerca eléctrica móvil, que pueda retirarse con facilidad para realizar los raleos y cosecha a futuro de los árboles. Los costos de la cerca incluyeron la mano de obra, el aislamiento, la depreciación y los insumos necesarios para su establecimiento (Tabla 3).

**Tabla 2.** Costos de gestión, preparación y establecimiento.ha<sup>-1</sup> de árboles en franjas, como parte de un sistema silvopastoril, en la modalidad de alta (MAI) y baja inversión (MBI) (1US\$ = ¢575, precios nominales junio 2017).

Actividad	Unidad	Jornales	MAI Insumos (¢.ha <sup>-1</sup> )	MAI Mano obra (¢.ha <sup>-1</sup> )	MBI Insumos (¢.ha <sup>-1</sup> )	MBI Mano obra (¢.ha <sup>-1</sup> )
<b>Gestión del proyecto</b>						
Recolección de información (inspección y medición de área)	Hora-profesional	4	-	2,087	-	5,217
Análisis de suelo	Ha	1	14,000	-	14,000	-
Análisis de documentos y estudio de registro	Hora-profesional (repartido en 20 o 50 ha según modelo de producción)	2	-	2,087	-	5,217
Formulación de propuesta	Hora-profesional	8	-	4,174	-	10,434
Informe de verificación de siembra	Hora-profesional	4	-	2,087	-	5,217
Verificación en campo del mantenimiento	Hora-profesional	4	-	2,087	-	5,217
Subtotal		23	14,000 (\$24)	12,522 (\$21)	14,000 (\$24)	31,302 (\$54)
<b>Preparación del terreno</b>						
Renovación de cercas viejas	Jornal	1,00	-	14,148	-	-
Drenajes primarios	Jornal	0,25	-	3,537	-	-
Drenajes secundarios	Jornal	0,25	-	3,537	-	-
Subsolado	Hora tractor	0,25	2,000	-	-	-
Arado	Hora tractor	0,25	2,000	-	-	-
Rastrea	Hora tractor	0,25	2,000	-	-	-
Lomillado	Hora tractor	0,25	2,000	-	-	-
Subtotal		2,5	8,000 (\$14)	21,222 (\$37)	-	-
<b>Establecimiento</b>						
Chapea manual (100% del área)	Jornal	1	-	14,148	-	11,385
Control químico de malezas 100% área	Jornal	0,25	-	3,537	-	-
Pre-emergente + adherente	Litro	0,15	1,661	-	-	-

**Tabla 3.** Costos de establecimiento de una cerca eléctrica para proteger la periferia de dos franjas con árboles, de 100 m de longitud y 6 m de ancho, como parte de un sistema silvopastoril de más de 50 ha. (1US\$ = ¢575, precios nominales de junio 2017).

Mano de obra	Unidad	Cantidad del Jornal	Costo.ha <sup>-1</sup> (¢)		
Aislamiento	Jornal	0,50	7,074		
Hoyado	Jornal	0,50	7,074		
Siembra de poste	Jornal	0,25	3,537		
Armado de la cerca móvil	Jornal	0,10	1,415		
Subtotal		1,35	19,100 (US \$33)		
Equipo	Cantidad	Vida útil (años)	Costo unidad (¢)	Costo.ha <sup>-1</sup> (1/50ha)	Costo.ha <sup>-1</sup> .año <sup>-1</sup>
Impulsor de 80 millas (110 voltios). (Teca)	1	8	137,500	2,750	344 (688)*
Cuchilla de doble tiro	1	5	9,100	182	36,4
Desviador de rallos	1	5	11,475	230	46
Cable ferro de 50 m	1	5	17,550	351	70,2
Varillas de copperweld	6	5	5,618	112	22,5
Tornillos de varillas copperweld	6	5	1,600	32	6,4
Panel solar o celdas fotovoltaicas	1	16	123,500	2,470	154*
Subtotal				6127 (\$10,7)	679 (1023) (\$1,2 a \$1,8)
Dispositivos	Cantidad	Vida útil	Costo e/u	Costo.ha <sup>-1</sup>	Costo.ha <sup>-1</sup> .año <sup>-1</sup>
Poste de fibra de vidrio	20	5	2,000	40,000	8,000
Postes de madera para las esquinas (2 m)	8	5	5,650	45,200	9,040
Cordón eléctrico (400 m )	1,2	5	30,000	36,000	7,200
Carrete	2	5	25,000	50,000	10,000
Manigueta	2	3	1,470	2,940	980
Cordón elástico (100 m)	4	3	1,800	7,200	2,400
Agarradera del portillo	2	3	1,900	3,800	1,267
Subtotal				185,140 (\$32)	38,887 (\$69)
Total				210,367 (\$366)	39,566 (39,910) \$=69

En el modelo de baja inversión, se asumió que la persona productora establece 2 franjas por hectárea, pero utilizando el perímetro de la finca o una combinación de ambas (Figura 1). Los costos de mantenimiento fueron constantes durante los primeros 4 a 5 años, debido a que el programa de control de malezas se mantuvo activo y demandó una atención importante para lograr reducir la competencia con gramíneas y otras plantas. En un ciclo completo de producción de melina, en 8 años, se estimó este rubro en ₡34 242 por hectárea. Para el MAI basado en plantaciones de melina, se puede observar en la Figura 2 que los mayores costos

ocurrieron en los años 0, 1, 5 y 8 (49,6%, 11,2%, 10,6% y 9,3% respectivamente). El año de establecimiento de la plantación, por lo general es alto en la actividad forestal (Murillo et al. 2017) y en el SSP evaluado, debido a que los costos de establecimiento de la cerca eléctrica incrementaron los costos. En el año 5 y 8 se efectuó el segundo aprovechamiento y la cosecha final. Esto explica por qué los costos son mayores, ya que se registró un aumento significativo debido a la actividad de aprovechamiento de los árboles de melina. Similar efecto ocurrió en las franjas de teca al año 16 (Figura 2, derecha).

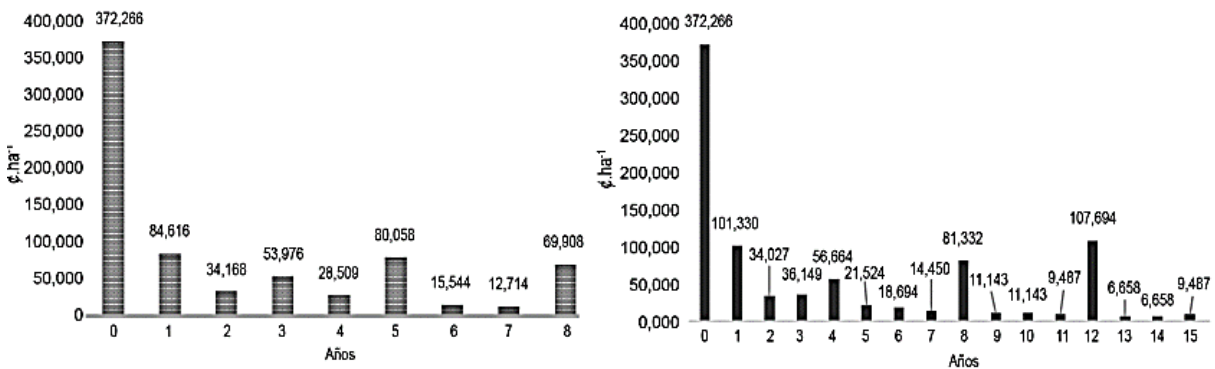


Figura 2. Costo anual de establecimiento y manejo de 150 árboles.ha-1 en franjas de melina (arriba) y teca (abajo), dentro de un sistema silvopastoril de alta inversión (precios nominales de junio 2017).

Con la teca, se observa (Figura 2, derecha) que el año 0 representa un 38,10% seguido de los años 1, 8, 12 y 16, que coincidieron con los años en que se planearon raleos y cosecha final según el paquete tecnológico. Esos costos representaron un 10,55%, 8,47%, 11,21% y 7,09% del total, respectivamente. Los años 1, 4 y 8 son relativamente caros, explicado por el mantenimiento inicial, el raleo y aprovechamiento de los árboles, en el caso de la teca. En la Figura 3, se puede apreciar el patrón de distribución del

costo total de producción de madera en las franjas. La mano de obra representó un 41 a 43% de los costos totales que correspondieron aproximadamente a 22,4 jornales.ha<sup>-1</sup> en un periodo de 8 años para melina y 29,45 jornales.ha<sup>-1</sup> en un ciclo de 16 años para teca. Esto significó un costo total de ₡314 662 y ₡416 640, respectivamente. La cerca eléctrica ocupó el segundo costo mayor (21 a 26%), seguido por la preparación del suelo (15 a 19%) con un monto de ₡88 000 en melina y ₡152 000 en teca.

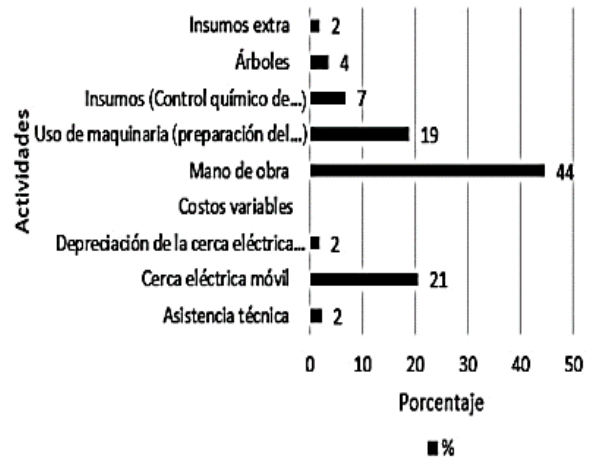
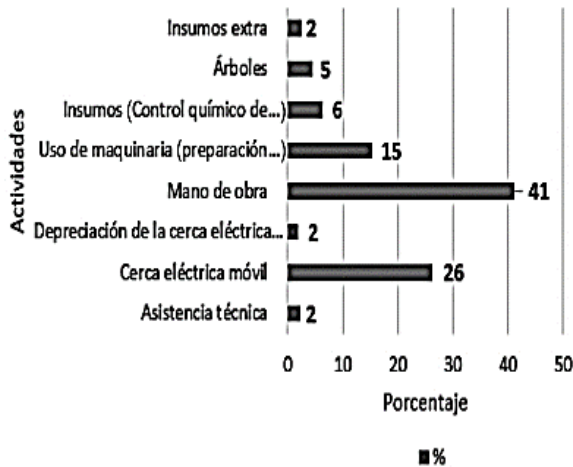


Figura 3. Distribución del costo de establecimiento de árboles en franja, como parte del modelo silvopastoril de alta inversión, basado en melina (izquierda) y teca (derecha). Con precios nominales de junio del 2017.

En las Tablas 4, 5 y 6, se muestra la distribución del costo anual de mantenimiento y manejo de franjas de ambas especies del SSP de alta inversión. Se observa que nuevamente la mano de obra en los raleos y la cosecha final representaron el rubro mayor (31 a 32%), seguido por el control de malezas (13,75 a 15%). En general, el mantenimiento y manejo de las 2

franjas.ha<sup>-1</sup> requirió de 16,4 jornales en melina y 23,6 en teca. El buen manejo inicial de la gramínea dentro del SSP propuesto, fue fundamental para evitar la competencia con los árboles. La prospección para el control de plagas y enfermedades (8 y 10% de los costos) se concentró principalmente durante los primeros 5 años para prevenir el ataque o eliminar a tiempo el material infectado.



Tabla 4. Costos de mano de obra para el cultivo anual de árboles de melina en franjas, como parte del modelo silvopastoril de alta inversión

Actividad	Rendimiento (J)	Años										Cantidad	Mano de obra (J) Rend*Cant	Costos (€·ha <sup>-1</sup> )	%
		0	1	2	3	4	5	6	7	8					
Control de maleza con motoguadaña	0,20		2	2	2	1	1	1	1	1	1	11	2,25	31,834	13,75
Rodajea manual	0,40		2									2	0,80	11,319	4,89
Control químico de malezas	0,17		3	3	3	3	2	2	2			18	3,11	44,002	19,01
Fertilización	0,35		1									1	0,35	4,952	2,14
Prospección y control plagas y enfermedades	0,25			1	1	1	1	1				5	1,30	18,393	7,95
Poda deshija	0,20		2									2	0,4	5,659	2,44
Poda de formación y recuperación de dominancia apical	0,50		2									2	1	14,148	6,11
Primera poda	0,30		1									1	0,3	4,245	1,83
Deshija o eliminación brote basal	0,30			1								1	0,3	3,537	1,53
Poda baja	0,50			1								1	0,5	7,074	3,06
Poda media	0,50				1							1	0,5	7,074	3,06
Poda alta	0,50					1						1	0,5	7,074	3,06
Raleos y cosecha final	1,7				1		1				1	3	5,10	72,157	31,00
<b>Total</b>													<b>16,41</b>	<b>231,468</b>	<b>100</b>

Tabla 5. Costos de mano de obra para mantenimiento y manejo anual del cultivo de árboles de teca en franjas, en el modelo silvopastoril de alta inversión

Actividad	Rendimiento (J)	Años														Cantidad	Mano de obra (J) Rend*Cant	Costo (€·ha <sup>-1</sup> )	%
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9-11	12	13-14	16					
Control de maleza motoguadaña	0,24		1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	2	1	15	3,60	50,935	15
Rodajea manual	0,40		2													2	0,80	11,319	3
Control químico maleza	0,177		3	3	3	3	2	2	2	2	3	1	2	1	27	4,77	67,488	20	
Fertilización	0,20		1												1	0,20	2,830	1	
Control plagas y enfermedades	0,20			1	1	1	1	1	1	1	3	1	2	1	14	2,28	32,259	10	
Amarre de árboles (viento)	0,50		1												1	0,50	7,074	2	
Poda o deshija (4-6 meses)	0,20		2												2	0,40	5,659	2	
Poda (h = 1,5m)	0,30		1												1	0,30	4,245	1	
Deshija	0,25			1											1	0,25	3,537	1	
Repaso de poda (150 árboles)	0,170				1	1	1	1	1	1					6	1,0	14,148	4	
Poda baja (h = 2,5m)	0,50			1											1	0,5	7,074	2	
Poda media (h = 5 m)	0,50				1										1	0,5	7,074	2	
Poda rama gruesa	0,30				1										1	0,3	3,820	1	
Poda alta (h = 7,5m)	0,5					1									1	0,5	7,074	2	
Control de rebrotes de tocón	0,2					1									1	0,2	2,830	1	
Raleos y cosecha	1,87				1			1		1		1		4	7,50	106,114	32		
<b>Total</b>																<b>23,6</b>	<b>333,480</b>	<b>100</b>	

Tabla 6. Costos de establecimiento de la cerca viva, alrededor de 2 franjas de 100 m de longitud y 6 m de ancho, dentro de un sistema silvopastoril (1 US \$ = ¢575, precios nominales de junio 2017).

Insumos	Cantidad	Precio/unidad (¢)	Costo (¢.ha <sup>-1</sup> )
Poste vivo	14	1,200	16,800
Estacones	36	300	10,800
Alambre de púas (330 m)	2	19,111	38,222
Bolsa de grapas	1	1,230	1,230
Subtotal			67,052 (\$116)
Mano de obra	1,5 Jornales		17,078 (\$29)
<b>Costo Total</b>			<b>84,130 (\$146)</b>

Modelo silvopastoril de baja inversión (MBI) En el modelo de baja inversión, los costos difieren en el tipo de cerca, ya que no incluyen la preparación del terreno. El costo del jornal fue levemente inferior por incluir el pago voluntario de la seguridad social. Por tanto, los costos totales de mano de obra.ha<sup>-1</sup> para plantación de melina fue de ¢231 468, que correspondió aproximadamente a 16,4 jornales en un periodo de 8 años. Mientras que con teca, se debió invertir aproximadamente ¢333 480. ha<sup>-1</sup> y representaron 23,6 jornales en un periodo de 16 años. En ambas especies, ese costo significó el 45% del costo total en el modelo de

baja inversión, similar en proporción al modelo de alta inversión. Por el uso de maquinaria para el aprovechamiento de los árboles en los raleos y la cosecha final, se requirió invertir un total de ¢80 000 y ¢144 000, respectivamente. Finalmente, la instalación de la cerca viva presentó un costo de ¢67 052 (9%), que con la mano de obra llegó a ¢84 130 (Tabla 6). En la Tabla 7, se puede apreciar en detalle el costo total.ha<sup>-1</sup> para los 2 modelos propuestos (MAI y MBI) y para cada especie. Debido a que la melina tiene un ciclo de 8 años, el costo de la cerca mostró mayor relevancia, ya que alcanzó casi un 50% de su costo total en el MAI y de casi un 4% en el MBI.

Tabla 7. Costo total del cultivo de árboles en franja, en el modelo silvopastoril de alta (MAI) y en el de baja inversión (MBI) para melina y teca, con costo nominal a junio 2017.

Especies	MAI				MBI			
	Melina Ciclo corto de 8 años	%	Teca Ciclo medio de 16 años	%	Melina Ciclo corto 8 años	%	Teca Ciclo medio 16 años	%
Establecimiento de cercas	372,266	49,6	372,266	38,6	215,634	39,51	215,634	30,1
Mantenimiento y manejo	299,493	39,7	450,552	46,6	250,105	45,83	355,414	49,7
Raleos y cosecha	80,000	10,6	144,000	14,9	80,000	14,66	144,000	20,2
<b>Total</b>	<b>751,759</b>	<b>100</b>	<b>966,818</b>	<b>100</b>	<b>545,739</b>	<b>100</b>	<b>715,548</b>	<b>100</b>

## DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación indican que el costo total de establecimiento de

melina en franjas, que incluyeron las cercas, fue de ¢372 266 para el modelo de alta inversión (MAI) y de ¢215 133 para el de baja inversión (MBI), que presentaron una diferencia de 45,6% (Tabla 7). Esta diferencia se explica principalmente porque en MAI se incluyó una cerca eléctrica y en el de MBI, una cerca viva convencional. El costo de

instalar una cerca eléctrica representó un 20% del costo total de establecimiento y manejo de los árboles en franja del SSP. Sin embargo, si se deprecia el valor de la cerca y se prorroga entre el número de años de vida útil de la plantación forestal, su valor anual descendió considerablemente, esto es, solo  $\text{C}\$13\ 247.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ , en el caso de siembra de melina y  $\text{C}\$16\ 560.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  en el caso de siembra de teca. En el MBI, la relación de costos fue mucho menor, tal y como se presumió al utilizar una cerca convencional, situación que se adapta mejor a la condición usual de pequeñas y medianas personas productoras, donde se aprovechan mejor los mismos recursos de la propiedad, con posibilidad de establecer el cultivo de árboles en franjas en la periferia de los potreros y no con alta intensidad. $\text{ha}^{-1}$ , como lo establece el modelo respectivo. Así se requiere solamente el establecimiento de la cerca interna para completar la protección de los árboles en franja del SSP. Adicionalmente, el costo de mano de obra también fue menor, ya que se presumió que la persona dueña de la propiedad paga su seguro voluntario.

Si se compara este costo con el del establecimiento de una plantación forestal regular en bloque con 833 árboles. $\text{ha}^{-1}$  ( $\text{C}\$642\ 000$ , González 2014,  $\text{C}\$632\ 500$ ,  $\$1100$ , Kottman 2013), puede observarse que cultivar 150 árboles en este sistema silvopastoril de MAI y MBI, presentó un costo aproximado de tan solo un 50% y un 33% respectivamente. Si se toma en cuenta que más del 50% del costo del cultivo de árboles en franjas corresponde a las cercas, su valor correspondió entonces entre un 17,5% a un 25% de una plantación compacta convencional. Podría también, presumirse que esta relación de costos es de 1/5 entre ambos sistemas. Debe también señalarse que un SSP es un concepto integrado entre producción forestal y ganadera. Por tanto, el costo de las cercas propone el ser compartido entre ambas actividades.

Debe mencionarse aquí el supuesto con que se construyó la base de datos, donde se indicó que, el SSP de baja inversión (MBI) y el de alta inversión (MAI), no afectaron de manera diferente la productividad y tasa de crecimiento del cultivo de árboles en franja. Se asumió que se mantuvo constante los 8 años para melina y los 16 años para teca. Fue de esperar, que a mayor inversión de

tecnología, los árboles presentarían una mayor tasa de crecimiento, y por tanto, una reducción de entre 1 o 2 años para llegar a cosecha final.

En el caso de la melina, la relación sería de 150 árboles. $\text{ha}^{-1}$  en el SSP vs 625. $\text{ha}^{-1}$  en bloque compacto, que implicó una proporción de 4,17 ha en SSP para plantar la misma cantidad de árboles. La relación en el costo de ambas modalidades de plantación fue de  $\text{C}\$752,480$  del SSP \* 4,17 ha vs  $\text{C}\$2\ 773\ 913$  (González 2014); es decir, para producir la misma cantidad de árboles se debe plantar 4,17 ha en SSP, pero costará  $\text{C}\$3\ 130\ 625$  (un 13% más caro), si se compara con los costos del modelo de baja inversión (MBI), la relación de costos sería positiva para el SSP. El costo de las 4,17 ha en SSP fue de  $\text{C}\$2\ 273\ 912$ , un 18% más económico.

En el caso de la teca, la relación del número de árboles fue de 5,55 ha de SSP para plantar los mismos 833 de la hectárea compacta, aunque los costos fueron  $\text{C}\$5\ 373\ 066$  lo que significó un 41% más costoso que los  $\text{C}\$3\ 799\ 145$  de la hectárea compacta (González 2014). En el modelo de baja inversión, sin embargo, los costos de las 5,55 ha del SSP con teca fueron de  $\text{C}\$3\ 968\ 123$ , que superó en un 4% los costos de la hectárea planta-da en forma compacta o convencional.

Del costo total del cultivo de árboles en las franjas, la mano de obra fue el rubro de mayor importancia con aproximadamente un 41% y 44% en melina y teca, respectivamente (Figura 3). Los altos costos de mano de obra en el establecimiento de las franjas del SSP, pudieron ser uno de los elementos que explican la poca adopción de estos sistemas (Villanueva et al. 2010). Sin embargo, los SSP bien diseñados y manejados tienen un potencial para mejorar los indicadores económicos, sociales, ambientales de las fincas ganaderas y del paisaje, fundamental para alcanzar una producción animal de forma sostenible (Villanueva et al. 2010, Ochoa y Valarezo 2014).

En el estudio de caso reportado por Souza (2002), se realizó un análisis de la contribución de los árboles en potreros a la rentabilidad de las fincas ganaderas. Se determinó que el costo total. $\text{ha}^{-1}$  fue de  $\text{C}\$1\ 318\ 800$  (US  $\$2355$ ). Indica también que la mayor rentabilidad se alcanzó en fincas con sistemas de producción de doble propósito y carne.

Para optimizar la inclusión de árboles en franjas en el SSP, se propone diseñar otros espaciamentos o distribuciones espaciales, que permitan aumentar el número de individuos en la franja, su productividad y calidad, con los mismos costos de establecimiento. Podría también analizarse la opción de plantar a mayor densidad inicial, de modo que posibilite uno o dos raleos comerciales, aproximadamente a los 3 y 5 años en melina y 5 y 8 años en teca, que supondría un mejor flujo de caja y de ingresos con una mejor relación de costos del sistema. Los diseños de SSP podrían ser mejorados si se revisa la capacidad de carga (área basal) que soporta el sistema y su relación con el crecimiento diamétrico. Estudios preliminares, de espaciamentos dentro de estas franjas, están demostrando que las 2 hileras de borde registran un crecimiento diamétrico mayor al de la hilera central (Murillo y Badilla 2019), tal y como sería esperable. Por tanto, un nuevo diseño SSP podría incluir una mayor densidad de árboles, pero únicamente en las 2 hileras de borde, con 2 objetivos: 1) aumentar la captura de carbono y 2) aprovechar su mayor tasa de crecimiento para aumentar su productividad.

Si se quisiera relacionar el modelo de costos a su valor del 2020, se puede observar que el índice de precios del consumidor ha sido de un promedio entre 1,5 y 2% anual, entre el periodo del 2017 y el 2020 (IPC 2020); la relación del colón con el dólar se ha mantenido casi exactamente con el mismo valor de ₡575 en este periodo de años; mientras que el costo del jornal se ha apreciado en un 9% con un monto de ₡9711 en el 2017 hasta ₡10 620 en el I semestre del 2020 (MTSS 2020), con una proporción muy cercana al de la tasa de inflación del 2% anual. Puede observarse que aunque el conjunto de datos pudo aumentar levemente del 2017 al 2020, la baja inflación del periodo y el mantenimiento del dólar en un valor exactamente igual, permite asumir que el conjunto de las relaciones y proporciones de los costos de todo el modelo, se mantienen muy similares al día de hoy.

Se considera que esta base de datos comprende todas las labores en que se incurren para establecer el componente forestal en un SSP. Con los resultados, se esperaría que se motive el sector ganadero para que incorpore el componente forestal en sus fincas con un enfoque productivo.

La producción ganadera, junto con la producción de madera, pueden proporcionar aportes de carbono neutralidad del país.

## CONCLUSIONES

El costo total para producir madera en 2 franjas.ha<sup>-1</sup> con 150 árboles en el modelo de alta inversión del SSP, se estimó en ₡751 759 (US \$1307), en un ciclo de 8 años con melina. Mientras que, con teca en un ciclo de 16 años, el costo total estimado fue de ₡ 966 818 (US \$1681). Para el modelo de baja inversión el costo total del cultivo de árboles en franjas en SSP, para melina, es de ₡545 739 (US \$949) y para teca ₡714 548 (US \$1242). El costo de la mano de obra fue el rubro de mayor peso dentro de la estructura de costos, con un 41% y 44% en melina y teca, respectivamente, seguido por el de la cerca eléctrica. Para plantar en un SSP la misma cantidad de árboles.ha<sup>-1</sup>, de una plantación compacta en bloque, se requiere de 4,17 ha en melina y 5,5 ha en teca.

Los resultados del estudio destacaron la importancia de promover el uso de especies maderables de alto valor comercial, que permitan mejorar los ingresos de la finca. La investigación realizada tuvo como principal objetivo generar información sobre el costo de plantar árboles en franjas en fincas ganaderas, para motivar el fomento de su conversión en un sistema silvo-pastoril eficiente, de mayor impacto económico, social y ambiental.

## RECOMENDACIONES

Es importante continuar con las estimaciones del crecimiento de los árboles en las franjas de madera, ya que se espera una mayor tasa de productividad en su desarrollo por el efecto del espacio lateral abierto. Hay un vacío de información que persistirá hasta que nuevos estudios lo clarifiquen. En trabajos futuros, se deberán analizar financieramente la conveniencia y los atractivos que ofrece cada opción evaluada. Será importante determinar el monto de la inversión requerida en cada caso y su periodo de recuperación, con el propósito de diseñar y optimizar opciones de financiamiento del Fondo de Nacional de Financiamiento Forestal. Se

recomienda evaluar otros arreglos espaciales en la distribución de los árboles dentro de las franjas, con el propósito de aumentar la producción potencial de madera y la fijación de carbono del sistema silvopastoril. Será importante revisar y proponer mejo-ras en las prácticas silviculturales que demanden mayor cantidad de mano de obra.

## RECONOCIMIENTO

Esta investigación recibió apoyo de los fondos interuniversitarios de investigación FEES/CONARE; de la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal GENFORES, de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, de la Escuela de Ingeniería en Agronomía del TEC, del Instituto de Investigaciones y Servicios Forestales de la Universidad Nacional, y del Centro de Investigaciones en Nutrición Animal de la Universidad de Costa Rica.

## LITERATURA CITADA

- Casasola, F; Ibrahim, M; Sepúlveda, C; Ríos, N; Tobar, D. 2009. Implementación de sistemas silvopastoriles y el pago de servicios ambientales en Esparza, Costa Rica: una herramienta para la adaptación al cambio climático en fincas ganaderas. In Ibrahim, M; Sepúlveda, C (eds.). Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas como una medida de adaptación al cambio climático en América Central. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical (CATIE). p. 169 -188.
- CORFOGA (Corporación Ganadera). 2015. La ganadería sostenible en Costa Rica es una realidad. (Video). San José Costa Rica, CORFOGA .1 video. 6:16 min., son., color.
- FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y agricultura). 2013. Gran potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la ganadería (en línea). San José, Costa Rica. Consultado jun. 2015. Disponible en <http://www.fao.org/news/story/es/item/19816/icode/>
- Filomeno, SR. 2018. Potencial de mejoramiento genético en *Dipteryx panamensis* Pittier (FABACEAE). Tesis M.Sc. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 166 p.
- FONAFIFO. 2019. Visión de futuro 2040 y Plan Estratégico Institucional 2020-2025. (en línea). San José, Costa Rica. 22 p. Consultado 26 de mar. 2020. Disponible en <http://www.fonafifo.go.cr/media/2608/pei-2020-2025.pdf>
- Guevara, M. 2007. Análisis de costos y rendimientos de labores de mantenimiento y manejo de plantaciones de Acacia (*Acacia mangium*) propiedad de la empresa Ecodirecta S.A. Tesis Lic. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 145 p.
- Guevara, M; Murillo, O. 2009. Costos y rendimientos de ocho tipos de poda en plantaciones jóvenes de *Acacia mangium* Willd en la zona norte de Costa Rica. Kurú 6(17):51-57.
- González, E. 2014. Determinación del momento óptimo de cosecha final en una plantación de *Tectona grandis* de la zona norte de Costa Rica. Gestión de Rec. Naturales y Tecnologías de Producción. Tesis M.Sc. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 41 p.
- Ibrahim, M; Chacón, M; Cuartas, C; Naranjo, J; Ponce, G; Vega, P; Casasola, F; Rojas, J 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa aérea en sistemas de uso de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Agroforestería en las Américas 45:27-36. INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, Costa Rica). 2015. VI Censo Nacional Agropecuario. Resultados Generales. Informe 2014. San José, Costa Rica. 147 p.
- IPC (Índice de Precios al Consumidor de Costa Rica). 2020. Banco Central de Costa Rica. San José, Costa Rica. Consultado feb. 2020. Disponible en <http://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/costa-rica>
- Kottman, F. 2013. PanAmerican Woods S.A. Costa Rica. InDe Camino, R; Morales, JP (eds.). Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades. Boletín Técnico 397. Turrialba, Costa Rica, CATIE. p. 86 -111.
- MAG CORFOGA INTA CNPL PNUD. 2017. Manual Operativo del Plan Piloto Nacional del NAMA Ganadería. 2 ed. San José, Costa Rica, Programa Nacional de Ganadería, MAG. 56 p.
- Méndez, E; Beer, J; Faustino, J; Otárola, A. 2000. Plantación de árboles en línea. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 134 p. MTSS (Ministerio de Trabajo y Seguridad Social).

- Lista de salarios de Costa Rica. 2020. San José, Costa Rica. Consultado feb. 2020. Disponible en [http://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/Documentos-Salarios/Lista\\_salarios\\_2020.pdf](http://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/Documentos-Salarios/Lista_salarios_2020.pdf)
- Murgueitio, E; Ibrahim, M. 2008. Ganadería y medio ambiente en América Latina, Ganadería del futuro: investigación para el desarrollo. Fundación CIPAV. Cali, Colombia. p. 19-40.
- Murgueitio, E. 2009. Incentivos para los sistemas silvopastoriles en América Latina. Revista Avances en investigación agropecuaria 13(1):3-18.
- Murillo, O; Paniagua, W; Badilla, Y; Rojas, A; Arce, J; Corea, E. 2013. Modelo silvopastoril orientado a la reducción de la huella de carbono y al aumento de la productividad económica. Cartago, Costa Rica, Proyecto interuniversitario CONARE. s.p.
- Murillo, O, Badilla, Y. 2015. Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago por servicios ambientales para la medición de la biomasa para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono. Informa Final de Consultoría. FONAFIFO, Dirección de Desarrollo y Comercialización de Servicios Ambientales, San José, Costa Rica. 108 p.
- Murillo, O; Badilla, Y; Rojas, F; Torres, G; Carvajal, D; Canessa, R. 2015a Informe final de proyecto de investigación “Cultivo de especies maderables nativas de alto valor para pequeños y medianos productores”. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 78 p.
- Murillo, O; Leitón, M; Ospino, M; Badilla, Y Paniagua, W; Valverde, A. 2015b. Hacia un nuevo sistema silvopastoril. San José, Costa Rica. Colegio de Ingenieros Agrónomos. Revista Germinar 5(17):16 -17.
- Murillo, O; Torres, G; Carvajal, D; Badilla, Y. 2017. Costos de producción de árboles de navidad (*Cupressus lusitanica* Mill.) en Costa Rica. Revista Agronomía Costarricense 41(1):81-93.
- Murillo, O. Badilla, Y. 2019. Proyecto de investigación. Optimización del componente forestal del programa nacional de fomento de sistemas silvopastoriles carbono-neutral. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Vicerrectoría de Investigación y Extensión/Escuela de Ingeniería Foresta. Cartago, Costa Rica. 22 p.
- Ochoa, KD; Valerezo, JM. 2014. Caracterización y análisis de rentabilidad de los sistemas de producción ganaderos presentes en el cantón Yantzaza, Ecuador. Revista CEDA M A Z 4(1):76 -85.
- Paniagua, W; Mora, G; Badilla, Y; Murillo, O; Rojas, A; Campos, C; Corea, E; Ospino, M; Lazo, G. 2015. Manual para el establecimiento de un Sistema Silvopastoril utilizando arboles maderables de alto valor económico. ITCR-UNA-UCR. San Carlos, Costa Rica. 20 p.
- Souza de Abreu, MH. 2002. Contribution of trees to the control of heat stress in dairy cows and financial viability of livestock farms in humid tropics. Tesis Ph.D. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 47 p.
- Vallejos, J. 2019. El cultivo del pilón (*Hyeronima alchorneoides* Allemão) en Costa Rica. Tesis M.Sc. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 97 p.
- Villanueva, C; Ibrahim, M; Murgueitio, E. 2010. Producción y rentabilidad de sistemas silvopastoriles: Estudios de caso en América Central. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 78 p

2. Ospino, M., Murillo, O., & Alfaro, M. (2022). Análisis financiero y de escenarios de financiamiento del componente forestal en sistemas silvopastoriles. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 19(45). <https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i45.6323>

## **Análisis financiero y de escenarios de financiamiento del componente forestal en sistemas silvopastoriles**

### **Financial analysis and financing scenarios of the forest component in silvopastoril systems**

Mónica Ospino Olman Murillo Marielos Alfaro

Recibido: 19/1/2021 Aceptado: 4/2/2022

#### **Abstract**

This research aimed the determination of the forest component profitability in a new silvopastoril design system (SSP), along with financial scenarios analysis. The SSP model allowed the conciliation of both forest production tree species with livestock cycles. Operative financial analysis was based on teak and melina clonal cultivation, the most planted trees in the country. The new SSP design consisted in the establishment of wood production in 6m wide stripes, where the trees are planted in a 2.5 by 4m distance, in an irregular spatial distribution. It allows the establishment of 75 trees in 100 m of longitude. A high profitability in all financial indicators was determined for both species, based on a 6 % interest rate. High Investment Model in melina obtained a PNV of ¢ 1, 131,349 (US\$ 1 780), with a B/C relation of ¢ 2,68, and a IRR of 28,46 %. With teak PVN was ¢ 889,628 (US\$ 1 400), a B/C of ¢ 2,41 and an IRR of 14,9 %. In the Low Investment Model with melina, it was obtained a PNV of ¢ 400,000 (US\$ 630), a B/C of ¢ 2,51, and an IRR of 27 %. In teak it was obtained a NPV of ¢ 378,495 (US\$ 600), with a B/C of ¢ 1,70, and an IRR of ¢ 12,18 %. The best financial scenario was a credit at 6% interest with a ESP. 1. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal, ospinomoa@gmail.com 2. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal, olmuga@yahoo.es 3. Universidad Nacional de Costa Rica. Escuela de Ciencias Ambientales. marielos.alfaro@gmail.com Financial analysis and financing scenarios of the forest component in silvopastoril systems Análisis financiero y de escenarios de financiamiento del componente forestal en sistemas silvopastoriles

**Keywords:** Financial analysis, economy, Environmental Services Payment, teak, melina, clonal forestry.

## Resumen

La investigación tuvo como objetivo determinar la rentabilidad del componente forestal en un nuevo diseño silvopastoril (SSP), junto con el análisis del mejor escenario de financiamiento. El modelo SSP permitió conciliar los ciclos de producción forestal de ambas especies con la actividad ganadera. El análisis financiero operativo se basó en el cultivo clonal de teca y melina, las dos especies de mayor plantación y desarrollo en el país. El SSP diseñado consistió en el establecimiento de franjas de producción de madera de 6m de ancho, donde se plantan tres hileras de árboles a 2,5 m x 4 m, con 75 individuos/franja en 100m de longitud. Se determinó una alta rentabilidad en todos los indicadores financieros para teca y melina con una tasa de crédito del 6 %. El Modelo de Alta Inversión de melina obtuvo un VAN de ¢ 1, 131,349 (US\$ 1 780), con una relación B/C de ¢ 2,68 y una TIR de 28,46 %. Con teca el VAN fue de ¢ 889,628 (US\$ 1 400), con una relación B/C de ¢ 2,41 y una TIR de 14,9 %. En el Modelo de Baja Inversión con melina, se obtuvo un VAN de ¢ 400,000 (US\$ 630) con una B/C de ¢ 2,51 y una TIR de 27 %. En teca se obtuvo un VAN de ¢ 378,495 (US\$ 600), con una B/C de ¢ 1,70 y una TIR de 12,18 %. El mejor escenario de financiamiento fue el de crédito al 6% junto con el pago del PSA.

**Palabras clave:** Análisis financiero, economía, Pago de servicios ambientales, teca, melina, silvicultura clonal, SAF.

## Introducción

La ganadería es la actividad de mayor uso del suelo en el país, presente en más de 1,8 millones de ha (35% del país), con más de 45 mil fincas y en una extensión de más del 60% del territorio en uso agropecuario [1]. El ganado cárnico contribuye aproximadamente en un 1,5% del PIB, es la actividad económica que genera mayor empleo en el país con cerca de 100 mil empleos directos, que superaron industrias como la bananera o la cafetalera. Es sin duda uno de los principales motores del desarrollo rural de Costa

Rica [2]. Sin embargo, varios factores afectan la actividad que explican su vulnerabilidad, asociada a la pobreza y al bajo desarrollo humano. Esta actividad es por sí sola la que más emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) emite a la atmósfera. Esto ha motivado que los países en la región busquen desarrollar estrategias bajo en carbono, mejorar su capacidad de gestión y manejo de riesgos en el sector ganadero [3]. En Costa Rica se desarrolla la estrategia NAMA ganadería (Medidas de Mitigación Nacionalmente Apropriadas por sus siglas en inglés), la cual busca transformar a este sector en una actividad neutral o baja en carbono, que incorpore el uso de prácticas, dirigidas a un desarrollo sostenible [2].

Recientemente, el MINAE establece como su nueva política del sector forestal productivo, fomentar el establecimiento de al menos 5000 ha cada año y plantar al menos 500 mil árboles en SAF [4]. El concepto de SSP consiste en la asociación de la producción ganadera con la producción forestal, y no simplemente fincas ganaderas arboladas, donde los árboles prácticamente no contribuyen a la economía de la finca, tal y como fue concebido en el pasado [5], [6], [7]. Los SSP pueden contribuir significativamente a la conservación de la biodiversidad y pueden proporcionar tanto mitigación climática [6], como beneficios de adaptación. Por lo tanto, los SSP pueden ser vistos como agroecosistemas eco-intensificados con la capacidad de proporcionar altos niveles de servicios ecosistémicos.

Según el diseño y manejo estos SSP tienen potencial en términos de productividad y ambiente, que permiten mejorar los indicadores socioeconómicos de las fincas ganaderas [8], [9], [10]. Sin embargo, su adopción ha sido baja debido a la falta de capital de financiamiento y al bajo conocimiento técnico para su establecimiento y manejo [11], [12], [13], [14], [15].

En esta investigación se realizó un análisis financiero del componente forestal del SSP, basado en un nuevo diseño SSP de cultivo de madera en franjas, que se desarrolla en la zona norte del país desde hace poco más de 5 años [9],



[16]. Su objetivo fue evaluar su rentabilidad por medio de los indicadores financieros valor actual neto (VAN), relación beneficio costo (B/C) y la tasa interna de retorno (TIR). Así como determinar el mejor escenario de financiamiento, para su puesta en marcha por parte del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal.

## Materiales y métodos

El estudio base se desarrolló en la finca del Instituto Tecnológico de Costa Rica, localizada en La Vega, distrito de Florencia, San Carlos, zona norte del país. Se estableció un SSP en donde el componente forestal tenía como principal objetivo la producción de madera con carácter comercial. Se establecieron franjas con árboles de varias especies, de 6 m de ancho cada una y separadas cada 50m entre sí. El componente ganadero se desarrolló con un hato de 25 animales que rotaron durante ciclos de 2 años de engorde, en un sistema de rotación en 10 ha [9].

Para la construcción del análisis financiero se utilizó la información de teca y melina, por ser las dos especies de mayor tasa de plantación en el país y las que mantienen el paquete tecnológico de mayor evolución y desarrollo, basadas en el uso de clones de alto rendimiento. Dentro de cada franja se plantaron tres hileras de árboles en distribución "tresbolillo o pata de gallo", separadas por 2,5 m entre hileras y, dentro de cada hilera, los árboles se plantaron cada 4 m. Esto dio como resultado el cultivo de 75 árboles en 100 m de longitud de franja. En su versión más intensiva se pueden establecer dos franjas ha-1 (cada 50m), con lo que se lograría cultivar 150 árboles maderables por ha<sup>-1</sup> [9].

En lo posible, las franjas se deben establecer en una dirección este-oeste para reducir sombrero hacia la zona de pasto. Con esto es posible establecer hasta dos franjas de 600 m<sup>2</sup> cada una (1200 m<sup>2</sup>, 12 % en una hectárea) bajo producción de madera [10].

Basado en el modelo de costos del SSP [16], se estableció una proyección de ingreso esperados, estimado a partir del modelo de crecimiento y

rendimiento de plantaciones clonales de melina y teca en el país [17], [18]. Con base en esta estimación se construyó cuadros de volumen comercial esperado (m<sup>3</sup>/ha) y flujo de ingreso producto del raleo y cosecha final, como se muestra en los cuadros 1 y 4.

Se construyó el flujo de caja para un modelo de alta inversión (MAI), basado en dos franjas de madera ha-1, así como para un modelo de baja inversión (MBI) más afín para pequeños y medianos ganaderos. El ciclo de producción de madera se fijó en ocho años para melina y 16 años para teca.

Para el modelo de baja inversión se estimó un ingreso menor, basado en una tasa menor de crecimiento esperado (20 %) del DAP, la altura comercial y del volumen comercial. Las investigaciones muestran que el uso anterior del suelo y la preparación mecanizada, son elementos que explican una mayor productividad de la plantación forestal [19]. Característico de sitios con sobreexplotación ganadera, con prácticas de quema frecuentes, mal manejo de pastos en general. Con la preparación mecanizada del terreno se busca un mejor control de la vegetación existente (principalmente gramínea) y mejorar las propiedades físicas del suelo (compactación y drenaje), que aseguren el crecimiento adecuado según los requerimientos por especie [20]. Los precios promedio para la venta de la madera en pie utilizados se tomaron del reporte anual de la Oficina Nacional Forestal (ONF), según categoría diamétrica [21]. Por lo general se utiliza un valor de 362 pulgas madereras ticas (PMT) como conversión por metro cúbico. Sin embargo, dado que no toda la madera en plantación tiene características de valor comercial (Murillo, Badilla, Rojas 2011), se aplicó una penalización por la presencia de nudos o por rajaduras, médula o "corcho interno" y mala rectitud del fuste, tal y como lo sugiere la metodología de calidad de plantaciones [22]. Por tanto, se utilizó una relación de conversión de 320 PMT m-3 [23], con el propósito de evitar sobreestimar los ingresos esperados en la cosecha final. Para realizar el análisis financiero, el ingreso esperado fue proyectado a valor futuro

con base en una tasa de interés del 6 %, tasa actual de préstamos del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal de Costa Rica (FONAFIFO [www.fonafifo.go.cr](http://www.fonafifo.go.cr)).

Para evaluar la rentabilidad en plantaciones

forestales de largo plazo, es necesario utilizar indicadores basados en el costo-beneficio actualizado, para controlar cambios que pueden ocurrir en el tiempo [24]. Por tanto, se calculó el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio costo (B/C).

**Cuadro 1.** Ingreso esperado por la madera de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) en un sistema silvopastoril de alta inversión, basado en dos franjas de madera/ha [10].

**Table 1.** Expected income from melina (*Gmelina arborea*) and teak (*Tectona grandis*) wood in a high-investment silvopastoral system, based on two strips of wood/ha.

	I raleo	II Raleo	III Raleo	Cosecha Final	Total
<b>Melina</b>					
Año	3	5		8	
N	75	38		37	150
m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	5,75	17,7		39,5	63
¢ ha <sup>-1</sup>	206 850	679 460		1 791 760	2 678 060
<b>Teca</b>					
Año	4	8	12	16	
N	60	36	27	27	150
m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	2,0	4,0	7,3	24,8	38,0
¢ ha <sup>-1</sup>	50 250	252 560	752 470	3 264 230	4 319 500

\*Ingresos sin actualizar, N = Número de árboles en 2 franjas / ha

**Cuadro 2.** Flujo de caja de la producción de madera en dos franjas de melina (*Gmelina arborea*) ha-1, en sistemas silvopastoriles de alta inversión (MAI), en la zona norte de Costa Rica.

**Table 2.** Cash flow of wood production in two strips of melina (*Gmelina arborea*) ha-1, in high investment silvopastoral systems (MAI), in the north of Costa Rica

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total (cha <sup>-1</sup> )	Total (US\$)
Costos	372,987	84,616	34,168	53,976	28,509	80,058	15,544	12,714	69,908	752,480	1 185
Costo actualizado	372,987	79,827	30,409	45,319	22,582	59,824	10,958	8,456	43,861	674,222	1 060
Ingreso				206,850		679,460			1,791,760	2,678,060	4 220
Ingreso actualizado				173,671		507,729			1,124,171	1,805,572	2 845
Ingreso neto	-372,987	-84,616	-34,168	152,870	-28,509	599,398	-15,544	-12,714	1,721,850	2,474,117	3 900
Ing. Neto actualizado	-372,987	-79,827	-30,409	128,352	-22,582	447,905	-10,958	-8,456	1,080,310	1,656,567	2 600
Indicador financiero		VAN	¢1,131,349		R B/C	¢ 2,68		TIR	28,46 %		
			US\$ 1 780								

Con el propósito de mejorar el diseño de los sistemas de financiamiento que ofrece el FONAFIFO, se evaluaron cuatro posibles escenarios de fomento de SSP, dirigidos principalmente a medianos y pequeños productores. En el primer escenario se analizó la

utilización de la tasa básica pasiva; la cual es un promedio ponderado de las tasas de interés de captación brutas en colones, negociadas por los intermediarios financieros residentes en el país [25].

Para los escenarios dos y tres se utilizó como tasa el 6 % y 8 %, que corresponde con las tasas

de interés a las cuales presta actualmente el FONAFIFO en sus sistemas de crédito forestal [26].

Finalmente, en el cuarto escenario se utilizó una combinación del sistema de crédito asociado con el denominado Pago por Servicios Ambientales por Resultados (PSAR). En esta modalidad se evalúa una tasa de interés del 6 %, con la posibilidad de cancelar el préstamo en un plazo máximo de diez años. El crédito financia el establecimiento de los 150 árboles ha<sup>-1</sup> en el año cero y durante los primeros tres años de mantenimiento [26]. En el escenario IV el monto por árbol que paga el FONAFIFO en la modalidad de sistema agroforestal es de ¢3 500 (US\$ 5,5) [27]. Mientras que el crédito que se otorga en el año tres es de ¢528 542/ ha (US\$ 830), que cubre los costos de establecimiento y mantenimiento de este período. El dinero del PSAR junto con el ingreso de los raleos y cosecha, son utilizados para pagar los intereses del crédito.

El PSAR ingresa financieramente en tres desembolsos, el primer tracto del 65 % para la preparación inicial, establecimiento, mantenimiento y poda en el primer año; el segundo del 20 % para el mantenimiento y poda de los árboles durante el segundo año; y el último del 15 % para el mantenimiento y manejo de los árboles durante el tercer año.

## Resultados

La información financiera generada se organizó por separado para teca y melina, así como para

el modelo SSP de alta y baja inversión. Debe entenderse que el componente forestal sigue un comportamiento cíclico de producción, en turnos de 8 años (melina) y 16 años (teca). Que una vez concluidos, se repiten en el tiempo indefinidamente.

### Modelo de alta inversión (MAI)

Para el análisis del SSP de alta inversión con franjas de melina, los costos se mantuvieron constantes durante todo el ciclo de producción. Mientras que los ingresos se registraron en los años tres y cinco, conforme se ejecutan los raleos (cuadro 1).

Con las franjas de melina los dos primeros raleos registran costos menores que los ingresos, por lo que el ingreso neto esperado del primer raleo es de ¢152 870 (US\$ 240) y ¢599 398 (US\$ 940) del segundo raleo. Se estima que el ingreso neto total esperado en un ciclo de ocho años será de ¢2 474 117 (US\$ 3 895). En cuanto al VAN y la R B/C estos fueron positivos en todos los casos, mientras que la TIR es mayor a la tasa de descuento evaluada del 6 % (Cuadro 2).

En teca los ingresos netos son negativos debido a que el primer raleo efectuado en el año cuatro no cubre los costos totales. Para los siguientes raleos los ingresos netos son positivos, por lo que se estima recibir una ganancia neta de ¢171,229 (US\$ 270) al año ocho y ¢664 776 (US\$ 1 045) en el año doce. Mientras que en la cosecha final se espera obtener un ingreso neto de ¢3 196 115 (US\$ 5 035). Los indicadores financieros respectivos de teca se muestran en el cuadro 3.

**Cuadro 3.** Flujo de caja de la producción de madera en dos franjas de teca (*Tectona grandis*) ha<sup>-1</sup>, en sistemas silvopastoriles de alta inversión (MAI), en la zona norte de Costa Rica.

**Table 3.** Cash flow of wood production in two strips of teak (*Tectona grandis*) ha<sup>-1</sup>, in high investment silvopastoral systems (MAI), in the north of Costa Rica.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Total (cha <sup>-1</sup> )	Total (US\$)
Costos	372,987	101,330	34,027	36,149	56,664	21,524	18,694	14,450	81,332	11,143	11,143	9,487	107,694	6,658	6,658	9,487	68,111	967,539	1 525
Costo actualizado	372,987	95,594	30,284	30,351	44,884	16,084	13,179	9,610	51,029	6,596	6,222	4,998	53,520	3,121	2,945	3,959	26,812	772,174	1 215
Ingreso					50,249				252,561				752,470				3,264,227	4,319,506	6 800
Ingreso actualizado					39,802				158,460				373,955				1,284,951	1,857,167	2 925
Ingreso neto	-372,987	-101,330	-34,027	-36,149	-6,416	-21,524	-18,694	-14,450	171,229	-11,143	-11,143	-9,487	644,776	-6,658	-6,658	-9,487	3,196,115	4,012,121	6 320
Ingr. neto actualizado	-372,987	-95,594	-30,284	-30,351	-5,082	-16,084	-13,179	-9,610	107,431	-6,596	-6,222	-4,998	320,434	-3,121	-2,945	-3,959	1,258,139	1,686,004	2 655
Indicador financiero		VAN	€889,628		R B/C	2,41	TIR	14,49%											
			US\$ 1 400																

**Cuadro 4.** Ingresos esperados por venta de madera en franjas de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) en sistemas silvopastoriles en Costa Rica, para el modelo de baja inversión [10].

**Table 4.** Expected income from wood sale in melina (*Gmelina arborea*) and teak (*Tectona grandis*) strips in silvopastoral systems in Costa Rica, for the low investment model.

	I raleo	II Raleo	III Raleo	Cosecha Final	Total
<b>Melina</b>					
Año	3	5		8	
N	75	38		37	150
m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	2,94	9,06		28,3	40,3
¢ ha <sup>-1</sup>	101,490	333,385		1 437,030	1 871,900
<b>Teca</b>					
Año	60	36	27	27	150
N	4	8	12	16	
m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	0,53	1,99	3,29	14,260	20,07
¢ ha <sup>-1</sup>	13,430	125,910	338,870	1 880,630	2 358,840

\*Ingresos sin actualizar, N = Número de árboles en 2 franjas / ha

### Modelo de Baja Inversión

En el cuadro 4 se muestra el modelo de ingreso esperado en franjas de teca y melina en SSP para un MBI. Los resultados del flujo de caja para el MBI con melina se muestran en el cuadro 5. El ingreso neto esperado del primer raleo (año tres) es de ¢ 55 459/ha (US\$ 87). Mientras que con el segundo raleo (año cinco) se estima en ¢ 260 285 (US\$ 410). Para la cosecha final se estima que la ganancia neta total será de ¢1 372 713 (US\$ 2 160). Por lo que se espera recibir un total neto de ¢1 688 457/ha (US\$ 2 660) en un ciclo de producción de ocho años. Los indicadores financieros VAN y RB/C también

registraron valores positivos para este modelo, así como la TIR, con un valor superior a la tasa de descuento evaluada del 6 % (Cuadro 5). Con teca el resultado del flujo de ingreso neto es similar al del modelo de alta inversión, donde los costos del primer raleo (año cuatro) es mayor que la ganancia esperada. Mientras que para el segundo (año ocho) y tercer raleo (año doce) se estima un ingreso neto de ¢51 673 (US\$ 81) y de ¢239,339 (US\$ 377) respectivamente. Para la cosecha final se estima un ingreso total de ¢1 817 128 (US\$ 2 860) por tanto, el ingreso neto total durante el ciclo de producción de 16 años será de ¢2 108 140/ha (US\$ 3 320). Los indicadores financieros respectivos se pueden

observar en detalle en el cuadro 6. En el cuadro 7 se muestran los resultados del análisis financiero de los cuatro escenarios de financiamiento propuestos. Se puede observar que el escenario IV es el que obtiene mejores resultados al combinar el PSAR por resultados con el sistema de financiamiento de crédito. Al comparar el escenario II con el III, el crédito con una tasa de interés del 6 % es la que genera un VAN y una R B/C más atractiva. Lo que indica que ambos escenarios son capaces de devolver la inversión inicial, pagar el 6 % o el 8 % de la tasa de interés y generar una ganancia al productor. En cuanto a la TIR los resultados indican que en los escenarios II, III y IV los valores registrados superan ampliamente las tasas de referencia del 6 y 8 %. Se observa también que con melina, la tasa máxima de financiamiento (24 %) duplica a la de teca (12 %).

## Discusión

En este tema hay poca literatura reportada sobre análisis financieros o de producción de SSP. En la zona norte de Costa Rica, [8] se reporta una investigación sobre la rentabilidad de un SSP, basado en árboles dispersos en potreros, con las especies *Cedrela Odorata* y *Cordia alliodora*. Los indicadores financieros dan como resultado valores del VAN de ¢ 55 860/ha (US\$ 88), con una relación B/C de US\$ 1,09 [8]. Sin embargo, estos resultados no son comparables, debido al análisis basado en modalidades diferentes de SSP (árboles dispersos en potrero vs plantados en franjas). Además, en esta investigación se trabajó con especies exóticas de alta productividad (teca y melina), con un paquete tecnológico sumamente elaborado y basado en clones de alto rendimiento en campo.

Un estudio realizado por el INTA de Argentina (Instituto Nacional de Tecnología Agraria) se reporta una comparación de resultados financieros y económicos de proyectos forestales, ganaderos y silvopastoriles en la región de Misiones [14]. Los principales resultados obtenidos del SSP mixto con base en

*Pinus tadea*, reportan una rentabilidad con una tasa interna de retorno de 17 %. Concluyeron también que el acompañamiento de la actividad forestal con la ganadería genera mayores ingresos al productor, al combinar la actividad ganadera y orientar la producción forestal para obtener árboles de mayor calidad [28].

Al compararse los resultados del MAI y el MBI la melina duplica los valores registrados por la teca (27 y 28 % vs 12 y 14 %). Estas diferencias se explican por la mayor tasa de crecimiento y productividad de la melina [17] así como por el menor ciclo de producción de la melina (dos raleos y cosecha en ocho años, vs tres raleos y cosecha al año 16 en teca).

A pesar de que el precio de la teca es mayor en el mercado nacional e internacional, la mayor productividad de la melina y su ciclo más corto, repercuten en los indicadores financieros. Al actualizar los ingresos esperados e incrementar los años en la función de valor presente (VAN), su valor disminuye los ingresos al reducir el factor de actualización. Sin embargo, la rentabilidad analizada para las dos especies, tanto en su modelo de Baja Inversión como en el de Alta Inversión, es positiva y genera ingresos al productor. No obstante, es esencial considerar cuales especies son las más adecuadas y de mayor aceptación por parte de los productores ganaderos.

La resistencia del productor para el desarrollo de SSP está relacionada con el elevado costo inicial para su establecimiento, el costo de oportunidad asociado con periodos largos, en que el ciclo de producción comienza a generar productividad y también, la rentabilidad limitada que presentan en su mayoría [6]. Estudios preliminares sobre la rentabilidad de la incorporación de SSP en Costa Rica, muestran, que dependiendo de la tecnología se requiere una inversión inicial de entre US\$ 215 y US\$ 660 por hectárea, y se obtiene un retorno de entre 8 y 17 % [12]. A estas restricciones se agrega la limitante del productor para obtener crédito destinado a incorporar SSP, generalmente disponible para propósitos específicos (incorporación de pastura mejorada, compra

**Cuadro 5.** Flujo de caja para el financiamiento de franjas de melina (*Gmelina arborea*) clonal en SSP de baja inversión (MBI) en la zona norte de Costa Rica.

**Table 5.** Cash flow for the financing of clonal melina strips (*Gmelina arborea*) in low-investment SSP (LMI) in the northern zone of Costa Rica

Años	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total (¢ha <sup>-1</sup> )	Total (US\$)
Costos	215,633	57,269	40,910	46,034	23,263	73,101	13,746	11,469	64,314	545,739	860
Costo actualizado	215,633	54,027	36,410	38,651	18,426	54,625	9,690	7,627	40,351	475,442	750
Ingreso				101,492		333,386			1,437,027	1,871,906	2 950
Ingreso actualizado				85,215		249,126			901,609	1,235,949	1 950
Ingreso neto	-215,633	-57,269	-40,910	55,459	-23,263	260,285	-13,746	-11,469	1,372,713	1,688,457	2 660
Ingr. Neto actualizado	215,633	-54,027	-36,410	46,564	-18,426	194,500	-9,690	-7,627	861,257	1,102,322	1 736
Indicador financiero		VAN		¢400,00		R B/C		2,51	TIR	27,55	
				US\$ 630							

**Cuadro 6.** Flujo de caja para el financiamiento de franjas de teca (*Tectona grandis*) clonal en SSP de baja inversión (MBI) en la zona norte de Costa Rica.

**Table 6.** Cash flow for the financing of clonal teak strips (*Tectona grandis*) in low-investment SSP (LMI) in the northern zone of Costa Rica.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Total (¢ha <sup>-1</sup> )	Total (US\$)
Costos	215,633	57,269	40,910	46,034	23,263	73,101	13,746	11,469	64,314	545,739	860	9,487	107,694	6,658	6,658	9,487	68,111	967,539	1 525
Costo actualizado	215,633	54,027	36,410	38,651	18,426	54,625	9,690	7,627	40,351	475,442	750	4,998	53,520	3,121	2,945	3,959	26,812	772,174	1 215
Ingreso				101,492		333,386			1,437,027	1,871,906	2 950		752,470				3,264,227	4,319,506	6 800
Ingreso actualizado				85,215		249,126			901,609	1,235,949	1 950		373,955				1,284,951	1,857,167	2 925
Ingreso neto	-215,633	-57,269	-40,910	55,459	-23,263	260,285	-13,746	-11,469	1,372,713	1,688,457	2 660	-9,487	644,776	-6,658	-6,658	-9,487	3,196,115	4,012,121	6 320
Ingr. neto actualizado	215,633	-54,027	-36,410	46,564	-18,426	194,500	-9,690	-7,627	861,257	1,102,322	1 736	-4,998	320,434	-3,121	-2,945	-3,959	1,258,139	1,686,004	2 655
Indicador financiero		VAN	¢889,628		R B/C	2,41		TIR	14,49%										
			US\$ 1 400																

de equipo) y se pide requisitos difíciles de cumplir por el finquero [6]. La falta de mecanismos de financiamiento y de análisis financieros que demuestren la rentabilidad de los SSP limita su adopción [15]. Esto motivó la realización de esta investigación, que incluyera análisis de sensibilidad y de evaluación de cuatro posibles escenarios de financiamiento, en donde el escenario IV, que combina el crédito con un PSA por resultados, fue el que registró los valores más altos en todos los indicadores financieros. Es esencial desarrollar un sistema que se adapte al ciclo de producción forestal, donde el ingreso se obtiene en un largo plazo. El uso del mejor paquete tecnológico debe ser uno de los elementos de mayor relevancia para garantizar los resultados obtenidos en este estudio. El uso de clones de alto rendimiento debe ser uno de los criterios base para el desarrollo de estos SSP. Es importante también generar estrategias de

financiamiento que estimulen la participación del sector ganadero en estas opciones de producción forestal. El componente arbóreo dentro de una finca ganadera puede ofrecer múltiples servicios ambientales, adicionales a la madera. Una adecuada cantidad de árboles ha-1 en distintas modalidades SSP, permitiría que la ganadería en el país se situara en la corriente de actividad económica carbono neutral.

## Conclusiones

El diseño de SSP en franjas de producción de madera, registró una alta rentabilidad en todos los indicadores financieros para teca y melina (tasa de crédito del 6 %), que generó en melina un VAN de ¢ 1 131 349 (US\$ 1 780) con una relación B/C de ¢ 2,68 y una TIR de 28,46 %. Mientras que para teca, el VAN fue de ¢ 889 628 (US\$ 1 400) con una relación B/C de ¢ 2,41 y una TIR de 14,9 %

para el MAI. En cuanto al MBI (crédito al 6 %) se obtuvo un VAN para melina de ¢ 400 000 (US\$ 630) con una R B/C de ¢ 2,51 y una TIR de 27 %. Mientras que para teca se obtuvo un VAN de ¢ 378 495 (US\$ 600) con una R B/C de ¢ 1,70 y una TIR de ¢ 12,18 %. El resultado del análisis financiero muestra que el VAN es positivo y mayor que cero en los dos modelos evaluados, la relación B/C es mayor a uno y la TIR es superior a la tasa de interés evaluada en todos los escenarios. El mejor escenario de financiamiento de los SSP fue el de la modalidad de PSAR por resultados, unido con un sistema de crédito al 6 %.

## Agradecimientos

Esta investigación formó parte del proyecto interuniversitario (FEES), “Modelo silvopastoril orientado a la reducción de la huella de carbono y al aumento de la productividad económica”. Contó también con la colaboración de la Corporación Ganadera (CORFOGA), con apoyo del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) y del Dr. William Corrales

## Referencias

- [1] INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, CR). VI Censo Nacional Agropecuario. San José Costa Rica: INEC, 2015.
- [2] MAG, CORFOGA, INTA, CNPL, PNUD. Manual Operativo del piloto Nacional del NAMA Ganadería. Segunda edición. San José, Costa Rica. 2017
- [3] Anker P. “Producción animal”. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). [Online]. Recuperado de <http://www.fao.org/animal-production/es/>. Fecha de acceso: 25.May, 2017 ]
- [4] MINAE 2019. Decreto No 41772. Sobre los principios rectores del sector forestal productivo. Junio 5, 2019. San José, Costa Rica.
- [5] Pezo D. & Ibrahim M. Colección de módulos de enseñanza agroforestal No 2: Sistemas silvopastoriles. Proyecto agroforestal CATIE/GTZ. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 1998.
- [6] Ibrahim, M; Chacón, M; Cuartas, C; Naranjo, J; Ponce, G; Vega, P; Casasola & F; Rojas, J. “Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa aérea en sistemas de uso de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua”. *Agroforestería en las Américas*, vol. 45, pp. 27–36, 2007.
- [7] Casasola, F., M. Ibrahim, C. Sepúlveda, N. Ríos & D. Tobar. “Implementación de sistemas silvopastoriles y el pago de servicios ambientales en Esparza, Costa Rica: una herramienta para la adaptación al cambio climático en fincas ganaderas”, en M. Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas como una medida de adaptación al cambio climático en América Central, Ibrahim & C. Sepúlveda (Eds). Centro Agronómico Tropical (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 2009, pp. 169-188.
- [8] Souza de Abreu M.H. “Contribution of trees to the control of heats stress in dairy cows and the financial viability of livestock farms in the humid tropics”, Tesis de doctorado. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 2002.
- [9] Murillo O., Leitón M., Ospino M., Badilla Y., Paniagua W. & Valverde A. “Hacia un nuevo sistema silvopastoril”, *Revista Germinar*, vol 17, no 5, pp. 16-17, 2015.[10]Paniagua W., Mora G., Badilla Y., Murillo O., Rojas A., Campos C., Corea E., Ospino M. & Lazo G. Manual para el establecimiento de un Sistema Silvopastoril utilizando arboles maderables de alto valor económico. Proyecto FEES/CONARE. San Carlos, Costa Rica, 2015.
- [11] Alonzo Y., Ibrahim M., Gómez M. & Prins K. “Potencial y limitaciones para la adopción de sistemas silvopastoriles para la producción de leche en Cayo, Belice”, *Agroforestería de las Américas*, vol. 8, no. 30, pp.21-27, 2001.
- [12] Gobi J.A. & Casasola F. “Comportamiento financiero de la inversión en sistemas silvopastoriles en fincas ganaderas de Esparza, Costa Rica”, *Agroforestería de las Américas*, vol. 10, pp. 39-40, 2004.
- [13] Clavero, T., & Suárez, J. “Limitaciones en la adopción de los sistemas silvopastoriles en Latinoamérica”. *Pastos y Forrajes*, vol. 29, no. 3, Feb., pp. 307-312, 2006.
- [14] Colcombet I., Crechi E., Keller A., Pachas N., Fassola H., Lacorte S. & Esquivel J. “Comparación

- preliminar de resultados financieros y económicos de proyectos forestales, ganaderos y silvopastoriles en Misiones”, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. [Online]. Recuperado de <https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-resultados-financieros-economicos.pdf>. [Fecha de acceso: Nov. 23, 2017].
- [15] Villanueva C., Ibrahim M. & Murgueito E. Producción y rentabilidad de sistemas silvopastoriles: Estudios de caso en América Central. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 2010.
- [16] Ospino-Araya M., Badilla-Valverde Y., Paniagua-Madrigal W., Campos-Granados C. & Murillo-Gamboa O. “Costos de producción de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en sistemas silvopastoriles de la zona norte de Costa Rica”. *Agronomía Costarricense*, vol. 44, no. 2, Jul., pp. 155-173, 2020.
- [17] Quirós S. Modelos de crecimiento y rendimiento para plantaciones clonales de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Costa Rica. Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica, 2015.
- [18] Fallas, J.L. Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (*Tectona grandis* L.f) en Costa Rica. Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 2017.
- [19] Teca (*Tectona grandis* L. f.): condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”. Banco Mundial, Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) y Oficina Nacional Forestal (ONF). Moravia, San José. 2015.
- [20] Alvarado A. & Mata R. “Condiciones de sitio y la silvicultura de la teca”, en *Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades*, De Camino R., Morales J. P. (eds.). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Serie Técnica, Informe Técnico No. 397, 2013, pp. 54-87.
- [21] Oficina Nacional Forestal, “Nueva modalidad de pago por servicios ambientales”, Oficina Nacional Forestal, [Online]. Recuperado de <http://onfcr.org/article/nueva-modalidad-de-pago-por-servicios-ambientales/> [Fecha de acceso: 19. Abr, 2015].
- [22] Murillo, O. & Badilla, Y. Programa para la estimación de la calidad y valor de la plantación forestal. [Software]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2014. [23] Alfaro M. “Los sistemas de medición de madera. Desde el bosque”. Cámara costarricense forestal. Tech.Report. 11-13 p. 1 May. 2002. [24] González, E. “Determinación del momento óptimo de cosecha final en una plantación de *Tectona grandis* de la zona norte de Costa Rica”, Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 2014. [25] Banco Central de Costa Rica. “Metodología para el cálculo de la tasa básica pasiva”, Banco Central de Costa Rica, [Online]. Recuperado de: <http://indicadoreseconomicos.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Documentos/DocumentosMetodologiasNotasTecnicas/Metodolog%C3%ADa%20de%20c%C3%A1lculo%20Tasa%20B%C3%A1sica.HTM>. [Fecha de acceso: 8. Jun, 2017 ]
- [26] Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. “Presentan nueva modalidad de pago por servicios ambientales”. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal, [Online]. Recuperado de [http://www.fonafifo.go.cr/actualidad/noticias/ultimasnoticias/Modalidad\\_PPSA.pdf](http://www.fonafifo.go.cr/actualidad/noticias/ultimasnoticias/Modalidad_PPSA.pdf) [Fecha de acceso: 24. Ene, 2017]
- [27] Oficina Nacional Forestal. “Precios de la madera en Costa Rica para el primer semestre del 2016 y tendencias de las principales especies comercializadas”. Oficina Nacional Forestal, [Online]. Recuperado de <http://www.onfcr.org/media/uploads/documentos/precios-de-la-madera-en-costa-rica-2016.pdf> [Fecha de acceso: 10. Feb, 2017].
- [28] Argentina Forestal. “Los-sistemas silvopastoriles logran-mayor rentabilidad que la ganadería o forestaciones puras”. Argentina Forestal. [Online] Recuperado de <http://www.argentinaforestal.com/actualidad/politica-y-economia/24-general/5673-los-sistemas-silvopastoriles-logran-mayor-rentabilidad-que-la-ganaderia-o-forestaciones-puras>. [Fecha de acceso: 1. Oct, 2017].



### **3. Modelo de costos por árbol para el cultivo de madera de teca (*Tectona grandis* Linn f) en sistemas silvopastoriles.**

Joshua Jiménez-Jiménez, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, [joshuajimenez0098@gmail.com](mailto:joshuajimenez0098@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3573-1105>.

Olman Murillo-Gamboa, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, [omurillo@itcr.ac.cr](mailto:omurillo@itcr.ac.cr), <https://orcid.org/0000-0003-3213-8867>.

Yorleny Badilla-Valverde, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, [ybadilla@itcr.ac.cr](mailto:ybadilla@itcr.ac.cr), <https://orcid.org/0000-0002-6743-9734>.

**Agradecimiento:** Los autores agradecen el apoyo financiero de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), a la Corporación Ganadera (CORFOGA) y al Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO); para el desarrollo del proyecto denominado “Optimización del componente forestal del programa nacional de fomento de sistemas silvopastoriles carbono-neutral”.

### **Modelo de costos por árbol para el cultivo de madera de teca (*Tectona grandis* Linn f) en sistemas silvopastoriles.**

#### **Individual tree teak (*Tectona grandis* Linn f) cost-model for producing wood in silvopastoral systems.**

#### **Resumen**

El sector ganadero a nivel mundial representa una de las actividades con mayor impacto en la sostenibilidad del sector alimenticio, dada su importancia se han creado diferentes iniciativas que impulsan las prácticas de una ganadería sostenible. En América Latina la ganadería es la actividad de mayor uso de la tierra, con más de un 33% en Costa Rica, en regiones con los indicadores más bajos de desarrollo humano y con serias limitaciones para su sostenibilidad. Los sistemas silvopastoriles (SSP) ofrecen la oportunidad de integrar la actividad ganadera con la actividad forestal, con el fin de contribuir a lograr la carbono neutralidad de la ganadería y a generar nuevos ingresos en las fincas. Esta investigación tuvo como objetivo desarrollar un modelo de costos por árbol, para dos diseños de cultivo de madera de teca en franjas de SSP. Los tres primeros años representan el periodo de mayor inversión (56%), donde las actividades de mantenimiento acumulan la mayor cantidad de costo totales (52%). La inclusión de cerca eléctrica es rentable y representa el rubro de menor costo (7%). La producción de teca durante el ciclo completo de 16 años tiene un costo asociado por árbol de ₡3 178 (\$5,16) para el diseño 1 y ₡2 990 (\$4,82) para diseño 2.

**Palabras claves:** Ganadería, carbono neutro, sistemas agroforestales, economía forestal, flujo de costos.

#### **Abstract**

The livestock sector worldwide represents one of the activities with the greatest impact on the sustainability of the food sector; given its importance, different initiatives have been created to promote sustainable livestock practices. In Latin America, livestock farming is the activity with the highest land use, with more than 33% in Costa Rica, in regions with the lowest human development indicators and with serious limitations for its sustainability. Silvopastoral systems

(SSP) offer the opportunity to integrate livestock and forestry activities in order to contribute to achieving carbon neutrality in livestock farming and to generate new income on farms. The objective of this research was to develop a cost-per-tree model for two designs of teak wood cultivation in SSP strips. The first three years represent the period of greatest investment (56%), where maintenance activities accumulate the greatest amount of total costs (52%). The inclusion of electric fencing is profitable and represents the lowest cost item (7%). Teak production over the full 16-year cycle has an associated cost per tree of ₡3 178 (\$5.13) for design 1 and ₡2 990 (\$4.82) for design 2.

**Key words:** Livestock, carbon neutral, agroforestry systems, forest economics, cost flow.

## Introducción

La ganadería a nivel mundial representa una de las actividades con capacidad de proporcionar alrededor del 34% del suministro mundial de proteínas alimentarias (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2022). El sector ganadero genera una influencia positiva sobre la sostenibilidad del sector alimentario regional, lo que ha incentivado la creación del Programa Mundial para una Ganadería Sostenible de la FAO (2014), conocido como NAMA Ganadería (MAG et al., 2017). En el ámbito de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el programa prioriza en 5 de los 17 ODS, dentro de los cuales se encuentra “Acción por el Clima” (ODS 13) (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2016). Mismo en el que se enfatiza la mitigación de la huella de carbono; mediante el incentivo de alternativas como la agrosilvicultura y los sistemas silvopastoriles, por su efecto directo sobre los componentes de sostenibilidad.

En Costa Rica el 43,4% de las fincas agropecuarias mantienen el cultivo de pasto (naturales, mejorados y de corte) (INEC, 2014). En su gran mayoría, bajo el concepto de ganadería tradicional, con limitaciones para mitigar gases de efecto invernadero (GEI), provocados por esta actividad económica (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2010).

Los sistemas silvopastoriles relacionan el componente forrajero, el elemento forestal y la actividad ganadera (Murillo et al., 2013) de forma sinérgica. No obstante, puede generar un abanico de opciones como lo son los: árboles dispersos en potreros, cortinas rompevientos, cercas vivas, linderos (Bueno, 2012; Toruño et al., 2015); Sin embargo, a pesar de los beneficios ambientales de los árboles al SSP, su introducción y cultivo dentro del sistema ganadero carece de información esencial para su fomento (Murgueitio & Ibrahim, 2004). Dada la magnitud de la actividad ganadera en el país, se abre una oportunidad para la producción de madera de alto valor, asociado a la actividad ganadera. Que vendría a contribuir a resolver buena parte las debilidades socioeconómicas y ambientales del sector ganadero, así como del faltante de abastecimiento de madera para el país. Con el apoyo técnico de la Corporación de Fomento Ganadero (CORFOGA) y del Tecnológico de Costa Rica, junto con el apoyo financiero de Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), se puso en marcha nuevos diseños de SSP que permiten producir madera, incorporar sombra para el ganado y mejorar la producción ganadera en general en la región (Murillo et al., 2015).

El modelo de costos propuesto en esta investigación pretende aportar conocimiento sobre el efecto económico dentro de la sinergia de elementos además de los aportes ambientales y sociales. El diseño de SSP en franjas optimiza la cantidad y distribución de árboles dentro del arreglo espacial, lo que permitirá la producción de madera y captura de carbono de una manera eficiente y de bajo costo. Al mismo tiempo la actividad forestal incrementa el número de elementos activos que cumplen su papel como sumidero de carbono, incentivando una mayor tasa de mitigación de CO<sup>2</sup>. A pesar de la relevancia del fomento de SSP, se carece de información económica sobre su funcionamiento. Experiencias recientes han realizado

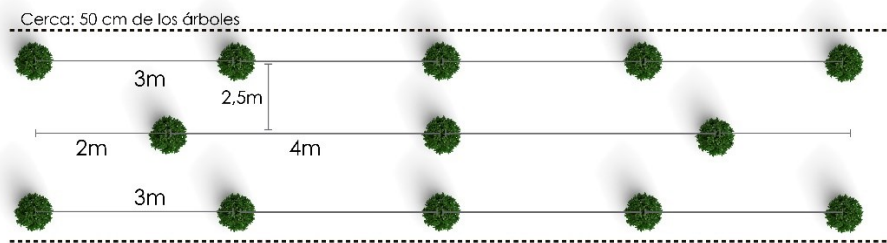
aportes significativos en el tema, sin embargo, basados en modelos de costos que asocian los costos del cultivo de árboles a la superficie destinada a su producción (Villanueva et al. 2010; Ospino et al., 2020; Ospina et al., 2022). Estos modelos de costos tienen como limitante la dificultad para adaptarse a otras densidades de siembra de los árboles, así como con otros arreglos espaciales no convencionales, tal y como se propone en los nuevos diseños de SSP (Paniagua et al., 2018).

El éxito en la adopción de la ganadería alternativa dependerá en gran parte de su factibilidad económica. Este estudio tiene por tanto como objetivo, aportar un modelo de costos flexible y adaptable a cualquier diseño de siembra, basado en el costo de producción del árbol individual, para el cultivo de teca en dos alternativas de diseño de franjas de madera dentro de sistemas silvopastoriles.

### Metodología

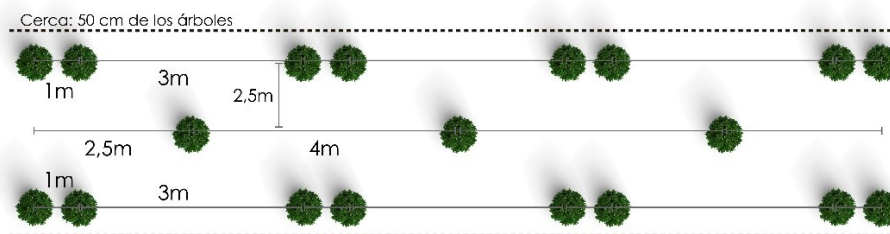
El componente forestal del modelo silvopastoril planteado consistió en árboles distribuidos en hileras dentro de una franja compacta de 6 m de ancho, ubicadas en pasturas, potreros, líneas divisorias de apartos para la alimentación animal; linderos o colindancias. El modelo de costos se creó para dos diseños de franja que optimizan la distribución de los árboles, tal y como se describe en la figura 1.

a) Diseño 1: Franjas de 6 m de ancho, con 3 hileras internas separadas a 2,5 m, con 0,5 m de cada lado de separación con la cerca. En las dos hileras de borde los árboles se plantaron a cada 3m, mientras que en la hilera del centro, cada 4m de distancia (Figura 1). Esta distribución de individuos permite plantar una densidad de 91 árboles por cada 100 m lineales de franja.



**Figura 1.** Diseño 1 de franjas del sistema silvopastoril (N en 100 m = 91).

b) Diseño 2: Franjas de 6 m de ancho compuesta por 3 hileras internas distanciadas a 2,5 m, con 0,5 m de cada lado de distancia con la cerca. En las dos hileras de borde los árboles se plantaron a cada 4m en parejas, separadas por 1 m entre ellos. Mientras que en la hilera del centro, cada 4m de distancia (Figura 2). Esta distribución de individuos permite plantar 125 árboles por cada 100 m lineales de franja.



**Figura 2.** Diseño 2 de franjas del sistema silvopastoril (N en 100m = 125).

El modelo analizado se basó en el cultivo de teca debido al impacto económico de la especie en el país, el mercados internacionales de su madera, así como su mayor desarrollo del paquete tecnológico (Murillo & Badilla, 2015).

El estudio de costos fue generado para las fases de establecimiento, mantenimiento, manejo y cosecha final del componente forestal del sistema silvopastoril, en un ciclo de 16 años, con raleos a los 5 y 10 años.

Este estudio tomó como línea base para la elaboración del modelo de costos, la investigación generada por Ospino et al. (2020) sobre producción de teca y melina en sistemas silvopastoriles de la Zona Norte de Costa Rica, así como las investigaciones en modelos de costos desarrolladas por Murillo et al. (2015) y Vallejos (2019) para plantaciones forestales en Costa Rica.

Es importante mencionar, que un modelo de costos responde a un paquete tecnológico determinado en el tiempo y siempre estará sujeto a cambios en el mercado de los insumos, así como en la innovación constante que busca reducir costos y optimizar labores.

La información de precios, del consumo y rendimiento de insumos, equipo y herramientas se obtuvo con base en consultas al comercio nacional. Cabe recalcar que la naturaleza de algunos productos como los herbicidas, genera fluctuaciones en el precio debido a distintos formatos de presentación y a la competencia de este mercado.

Como unidad base para poder desarrollar el modelo de costos, se utilizó una franja de 6m de ancho con una longitud suficiente para albergar 2000 árboles. Esta superficie efectiva es de 13 187 m<sup>2</sup> para diseño 1 y 9 600 m<sup>2</sup> para diseño 2.

Los valores de rendimiento de mano de obra para cada actividad se obtuvieron a partir de una base de datos de más de 13 empresas (Murillo et al., 2015; Vallejos, 2019), así como de estudios de tiempos y rendimientos (Guevara & Murillo, 2009; Guevara & Murillo, 2020), y de la adaptación de un primer estudio con SSP desarrollado por Ospino et al. (2020). Para algunas actividades nuevas como el uso de hoyadora y otras mejoras tecnológicas, se generó el rendimiento mediante la técnica de tiempos y movimientos en estudios de campo.

#### **El árbol como unidad de referencia.**

En el ámbito forestal es habitual prorratear los datos a valores por hectárea, no obstante, este valor como unidad de referencia presenta limitantes para la adaptación de los datos a un SSP con árboles en franjas o para muchas opciones de sistemas agroforestales. El número de franjas por hectárea y su longitud son diferentes para cada finca. La franja de madera dependerá de factores asociados a la actividad ganadera, como tamaño de la unidad de producción conocida como el repasto, linderos internos, linderos vecinales, etc. Por tanto, la hectárea no es la unidad de referencia objetiva de comparación para lograr establecer un modelo de costos. Por el contrario, el árbol como unidad de costos permite construir un modelo mucho más flexible y adaptable a cualquier distribución espacial, densidad de siembra, longitud y frecuencia de franjas, etc.

Para unificar criterios y adecuar el modelo a la actividad forestal del país, se asumieron las siguientes premisas:

- a) La longitud mínima de franja corresponde a 100 metros lineales para cualquiera de los diseños mostrados, lo que facilita y define la cantidad de árboles y superficie.
- b) El número de árboles de referencia del modelo debe oscilar entre los 1001 y 2000, de modo que coincida con la normativa establecida para la regencia profesional forestal del Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica.

Para un número mayor de árboles, la normativa contempla una valoración diferente en concepto de regencias, asistencia técnica o cantidad de informes a emitir.

El costo de los insumos por árbol se obtuvo de forma directa, al dividir su valor entre la cantidad de árboles plantados. Mientras que el costo de actividades o insumos que se aplican por unidad de área, tales como el control de malezas, establecimiento de cercas, entre otros,

su valor total se relacionó a una superficie determinada, de 100 m lineales, es decir 100m x 6m de ancho = 600 m<sup>2</sup>, prorrateada entre el número de árboles presentes (91 o 125, según el diseño SSP utilizado).

### Cerca eléctrica

Los costos asociados a la cerca se estimaron con base en el modelo de cerca eléctrica por su menor costo y mayor versatilidad. Se asumió que en un sistema silvopastoril se requiere construir solamente una segunda cerca del lado interno del potrero, ya que siempre existirá un lindero de previo. En detalle, se asumió que la cerca eléctrica está conformada por dos hileras de alambre a lo largo del perímetro de la franja, establecida con poste vivo cada 20 m y refuerzos con postes esquineros de madera. Se incluyó los costos de todos los elementos eléctricos convencionales del sistema, así como los costos de instalación. Se utilizó un pulsador con capacidad para 45 kilómetros y los componentes necesarios para su instalación. Para obtener un valor de referencia por metro lineal de cerca, se dividió el costo de los insumos y de instalación, entre la capacidad máxima en metros que el sistema puede alimentar de manera sostenible.

Se asumió que los costos del sistema de cerca eléctrica se comparten por partes iguales con el componente ganadero, ya que la cerca eléctrica desempeña la función de protección de los árboles (Méndez et al., 2000) y de aislamiento de los animales.

### Costo de mano de obra

El costo de la mano de obra se basó en lo establecido por la normativa nacional vigente, regulada por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (MTSS, 2021) para el peón agrícola (trabajador en ocupación no calificada), con datos del II semestre del 2021, con las respectivas cargas sociales como se muestra en el cuadro 1.

**Cuadro 1.** Cargas Sociales del sistema costarricense de seguridad social correspondientes con el costo del jornal.

<b>Caja Costarricense de Seguro Social</b>	
SEM	9,25%
IVM	5,25%
<b>Recaudación Otras Instituciones</b>	
Cuota Patronal Banco Popular	0,25%
Asignación familiar	5,00%
IMAS	0,50%
INA	1,50%
<b>Ley de Protección al Trabajador (LPT)</b>	
Aporte patrono Banco Popular	0,25%
Fondo Capitalización Laboral	1,50%
Fondo de Pensiones Complementarias	2,00%
INS	1,00%
<b>Total</b>	<b>26,50%</b>

Fuente: Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS, 2021).

Adicional a las cargas sociales, al peón agrícola en labores forestales se le incluyó una póliza de riesgo laboral (Instituto Nacional de Seguros [INS], 2021), con un costo de 4,61% sobre el salario reportado en planilla. Como extra al costo del jornal se contemplaron las coberturas a derechos de cesantía (8,33%), vacaciones (4,17%) y aguinaldo (8,33%).

El modelo debe incluir también el costo de regencia forestal para labores de raleos, cosecha y gestiones del Pago por Servicios Ambientales (PSA), así como el costo por asistencia técnica (González & Reiche, 1996).

El costo por honorarios profesionales está establecido por el CIAgro en ₡26 250 por hora

profesional para el año 2021 (Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica [CIAgro], 2021), junto con el número de informes y un número mínimo de 2 horas por visita para proyectos entre 1001 y 2000 árboles. El cálculo de horas regencia para certificado de origen, se obtuvo con base en el volumen esperado a cosechar en raleos y cosecha final, según el diámetro proyectado para las edades (Fallas, 2018) a las que se ejecutan las labores y la utilización del software de avalúos de Murillo (2022).

Los costos incurridos por el profesional forestal contemplaron montos asociados al concepto de alimentación y transporte.

En todos los casos el prorateo de los costos por árbol se obtuvo a partir de la relación del costo específico incurrido en cada actividad y distribuido entre la cantidad total de árboles establecidos en el año cero.

### Estimación de costo por jornal en concepto de uso de equipos y herramientas.

La depreciación del equipo (hoyadora, motosierra, motoguadaña; bomba de espalda, otros) utilizó el valor de mercado y la vida útil, estimada en términos de número de jornales de 8 horas (G. Trejos – Stihl, comunicación personal, 18 de julio 2021; Vedova y Obando, comunicación personal, 18 de julio 2021) Esta depreciación se determinó mediante el método de línea recta sin valor de rescate o de recuperación, obtenido mediante el cociente entre el costo del equipo o herramienta y su respectiva vida útil en jornales (ecuación 1). El número de jornales incluyó labores de mantenimiento del equipo, descansos del operario y reabastecimiento de combustible o aceite.

$$D = \frac{C}{V} \quad (1)$$

Donde:

D: depreciación en jornales.

C: costo de la herramienta o equipo.

V: vida útil en jornales.

Con la base de datos de costos organizada se determinó el peso porcentual de cada año y los periodos de alta y baja inversión. Los datos fueron también agrupados y analizados porcentualmente por actividad del ciclo productivo, tal como: Preparación, Establecimiento, Mantenimiento, Manejo y Aprovechamiento (raleos y cosecha) de la plantación. La base de datos fue finalmente organizada para determinar el peso económico de los Insumos, Mano de obra, Asistencia Técnica o Regencia, Cerca Eléctrica y Equipo o Herramientas-

## Resultados

El modelo de costos desarrollado se basa en una estructura para un productor ganadero, con capacidad de cultivar aproximadamente 2000 árboles distribuidos en franjas. Cada una de las etapas examinadas en el modelo (establecimiento, mantenimiento, manejo, raleos y cosechas) consideró la ejecución de actividades con base en el mejor paquete tecnológico vigente, que busca maximizar la producción de madera al menor costo.

En el cuadro 2 se muestra en detalle los costos de insumos y mano de obra para el establecimiento de la cerca eléctrica.

**Cuadro 2.** Costos de componentes para el establecimiento de la cerca eléctrica en un sistema silvopastoril de franjas de 6m de ancho. (1US\$ = ₡620)

Unidad eléctrica impulsora				
Componente	Precio (₡)	Alcance (m)	Costo (₡/Arb)	
			D1	D2
Pulsador eléctrico 110 v para 45 km	₡ 76 840	45 000 m	2,09	1,52
Interruptor de corriente	₡ 4 520	45 000 m	0,12	0,09
Protector de rayos	₡ 13 560	45 000 m	0,37	0,27

Varilla de cobre	¢ 9 040	45 000 m	0,25	0,18
<b>Subtotal</b>			<b>2,83</b>	<b>2,06</b>
<b>Componentes perimetrales</b>				
<b>Componente</b>	<b>Precio</b>	<b>Presentación</b>	<b>Costo (¢/Arb)</b>	
			<b>D1</b>	<b>D2</b>
Paquete - Aisladores de alambre	¢ 7 910	50 unidades	7,30	5,32
Rollo - Alambre aluminizado de alta resistencia	¢ 23 730	500 m	58,05	42,26
Paquete - Aisladores esquineros	¢ 3 995	25 unidades	3,69	2,68
Poste esquinero madera de 2 m	¢ 4 000	1 unidad	92,31	67,20
Poste vivo	¢ 500	1 unidad	23,08	16,80
<b>Subtotal</b>			<b>184,42</b>	<b>134,26</b>
<b>Mano de obra</b>				
<b>Actividad</b>	<b>Costo jornal</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Costo (¢/Arb)</b>	
			<b>D1</b>	<b>D2</b>
Instalación cerca eléctrica <sup>1</sup>	¢ 50 748	1000 m	71,26	51,88
<b>Total</b>			<b>258,51</b>	<b>188,20</b>

1 instalación de cerca requiere 3 personas por jornal/ kilómetro (D. Gonzáles, comunicación personal, 21 de junio de 2021).

El costo del jornal para el peón agrícola en planilla en el II semestre del 2021 correspondió a ¢12 782,98 jornal-1 (MTSS, 2021), que se obtuvo mediante el costo mensual ordinario (en planilla) de ¢319 574,46 dividido entre 25 días hábiles por mes. Mientras que el costo respectivo de las cargas sociales por aporte patronal (26,5%) correspondió a ¢3 387,49 jornal-1. El costo por concepto de póliza de riesgo laboral (4,61%) (INS, 2021) correspondió a ¢589,30 jornal-1, mientras que el costo por concepto de cesantía, vacaciones y aguinaldo (20,83 %) correspondió con ¢2 662,31 jornal-1, que finalmente resulta en un costo por jornal de peón agrícola de ¢19 422,07, si se realiza el cálculo a partir del salario mínimo mensual en planilla.

En el cuadro 3 se muestra en detalle el costo de la regencia y la asistencia técnica. El modelo de costos se basa en la premisa de la necesidad del regente o la asistencia técnica, en particular durante los primeros 2-3 años del cultivo de la madera. El profesional participa en la gestión de trámites para raleos o cosechas final y en lo relacionado con el otorgamiento del PSA.

Para teca con un ciclo productivo de 16 años, se establece asistencia técnica en los primeros 3 años, y luego en los años 5, 10 y 16.

La proyección de volumen a obtener con los raleos se estima inferior a los 100 m<sup>3</sup>, por lo tanto, de acuerdo con la normativa del Colegio de Agrónomos, requiere una única visita del profesional. Mientras que la proyección de volumen de cosecha final ronda los 199 m<sup>3</sup>, con lo cual requiere dos visitas del profesional forestal de 3 horas cada una. No obstante, adicional a la cantidad de visitar definidas por la normativa se agregó una visita extra en cada raleo para ejecución de labores de cierre de actividades.

**Cuadro 3.** Costo de la asistencia técnica, regencia e informes técnicos a emitir, para el establecimiento y manejo del componente forestal en un sistema silvopastoril en franjas. (1US\$ = ¢620)

Regencia y Asistencia Técnica	Costo (¢)	Años							Subtotal (¢/arb)
		0	1	2	3	5	10	16	
Asistencia Técnica (2 horas por visita + viáticos)	¢67 500	X	X	X	X	X	X		¢198,45
Inscripción anual proyecto PSA-SAF	¢4 075	X	X	X	X				¢8,56
Regencia raleo I teca (40%) (2 visitas)	¢187 500					X			¢39,38
Inscripción Certificado de Origen raleo I	¢12 910					X			¢2,71
Regencia raleo II teca (50%) (2 visitas)	¢187 500						X		¢29,55

Inscripción Certificado de Origen raleo II	€12 910	X	€2,03
Regencia cosecha final teca (100%) (2 visitas)	€187 500	X	€29,50
Inscripción Certificado de Origen cosecha final	€12 910	X	€2,03
<b>Total</b>			<b>€312,22</b>

En el cuadro 4, se muestra los precios de mercado para el primer semestre 2021, vida útil y respectivo costo asociado por jornal, para diferentes equipos y herramientas utilizadas en las labores de establecimiento, mantenimiento y manejo del componente forestal en SSP.

**Cuadro 4.** Costo de depreciación de equipos y herramientas para la ejecución de labores establecimiento, mantenimiento y manejo, del componente forestal en un sistema silvopastoril en franjas. (1US\$ = €620)

Equipos y Herramientas	Precio (€)	Vida útil (años)	Costo (€) / Jornal <sup>1</sup>	Años																Subtotal (€/arb)	
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	D1
Hoyadora	€307 464	4	€211	X																€0,25	€0,25
Bomba de espalda BOVI 18lts pro-18	€66 105	3	€60	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	€0,84	€0,61
Motoguadaña (FS 250)	€410142	4	€281	X																€1,17	€0,85
Motosierra (MS 180)	€220 000	4	€151	X				X				X								€0,95	€0,95
Motosierra de extensión (HT 103 EX5M)	€574 588	4	€393			X	X													€2,46	€2,46
Serrucho cola de zorro extensión (Truper)	€4 180	0,5	€23					X												€0,26	€0,26
<b>Total</b>																				<b>€5,93</b>	<b>€5,39</b>

<sup>1</sup> Costo por jornal = Precio de mercado / vida útil en jornales. (1 día de vida útil ≈ 1 jornal de 8 horas).

En el cuadro 5 se muestra los insumos, la presentación de cada uno de ellos acorde a la necesidad del SSP, el precio de mercado, la dosis recomendada y el respectivo costo por árbol. El costo del herbicida fue estimado a partir del área de la franja y prorrateado por árbol.

**Cuadro 5.** Costo de insumos para la preparación, establecimiento, mantenimiento y manejo del componente forestal en un sistema silvopastoril en franjas. (1US\$ = €620)

Insumos (árbol)	Unidad	Precio	Dosis Recomendada	Costo/arb	Años																Subtotal (€/arb)		
					0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	D1	D2
Mecate (trazado)	Pirola Rollo 1kg	€2 733	n/a	€1,37	X															€1,43	€1,43		
Fertilizante (10-30-10)	Saco 45kg	€22 500	50 g / arb	€25,00	X															€26,25	€26,25		
Fertilizante (12-24-12)	Saco 45kg	€22 500	100 g / arb	€50,00		X														€52,50	€52,50		
Abono Orgánico	Saco 40kg	€2 500	150 g / arb	€9,38	X															€9,84	€9,84		
Cal	Saco 50kg	€4 700	200 g / arb	€18,80	X															€19,74	€19,74		
Hidrokeeper	Bolsa 5kg	€14 250	0.5 l / arb	€7,13	X															€7,48	€7,48		
Árbol (+10% resiembra)	n/a	€265	n/a	€291,47																€306,05	€306,08		
Trasporte árbol <sup>1</sup>	n/a	n/a	n/a	€14,30																€15,01	€15,02		
Insecticida control de hormiga (Regent 20 SC)	Botella 100ml	€15 000	10 ml / bomba 20l = 800 arb (25ml/arb <sup>3</sup> )	€1,88		X	X	X												€11,81	€11,81		
Gasolina + Aceite 2T (hoyadora)	Litro	€912	277,8 hoyos / litro	€3,28	X															€3,79	€3,79		
<b>Subtotal</b>																				<b>€453,92</b>	<b>€453,95</b>		
Insumos (jornal)	Unidad	Precio	Dosis Recomendada	Costo/jornal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	D1	D2
Gasolina + Aceite 2T (motoguadaña, motosierra)	Galón	€3 686	1 galón por jornal	€3 686		X	X	X		X											X	€27,08	€22,92
Aceite para cadena	Galón	€5 500	1/2 galón por jornal	€2 750		X	X	X		X											X	€34,60	€34,60
<b>Subtotal</b>																						<b>€61,68</b>	<b>€57,52</b>



Insumo (área)	Unidad	Precio	Dosis Recomendada	Costo/m <sup>2</sup>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16			
Herbicida ancha (Espada 60WP Metsulfuron)	Hoja (Espada - Sobre 10g)	€950	30 g / Estación = 1 Ha	€0,29	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	€21,62	€15,74
Herbicida Gramínea (Fusilade EC)	12.5 Litro	€24 000	250 ml / Estación = 1 Ha	€0,60	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	€45,53	€33,14
<b>Subtotal</b>																						<b>€67,15</b>	<b>€48,89</b>	
Servicios	Unidad	Precio	Dosis Recomendada	Costo/arb	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16			
Análisis químico completo del suelo	n/a	€13 780	n/a	€9,19	X																		€9,65	€9,65
Análisis de textura	n/a	€13 100	n/a	€8,73	X																		€9,17	€9,17
<b>Subtotal</b>																						<b>€18,82</b>	<b>€18,82</b>	
<b>Total</b>																						<b>€601,56</b>	<b>€579,17</b>	

1 valor de referencia hasta un máximo de 100 km, 2 Disolución preparada.

En el cuadro 6 se presenta un resumen del costo anual por árbol distribuido en los rubros de asistencia técnica y regencia; cerca eléctrica, insumos, equipos y herramientas; mano de obra y servicios contratados, en función de las actividades que conforman el ciclo completo de cultivo de teca durante 16 años

**Cuadro 6.** Estructura de costos para dos alternativas de sistema silvopastoril en franja con teca (US\$ = €620)

Año	Actividad	Asistencia técnica y Regencia Costo/arb		Cerca eléctrica Costo/arb		Insumo Costo/arb		Equipo y Herramientas Costo/arb		Mano de obra Costo/arb		Servicio Contratado Costo/arb	Subtotal (€/arb)	
		D1 y D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1 y D2	D1
0	Preparación	€38	€259	€188	€25	€23	€0,08	€0,06	€25	€18			€346	€267
	Establecimiento		€390	€390	€0,25	€0,25	€187	€187					€577	€577
1	Mantenimiento	€38	€90	€82	€1,47	€1,11	€229	€194					€358	€314
2	Mantenimiento	€38	€22	€19	€0,83	€0,78	€175	€162					€236	€219
3	Mantenimiento	€38	€25	€23	€1,86	€1,84	€226	€219					€290	€282
4	Mantenimiento		€6	€4	€0,34	€0,32	€394	€387					€400	€392
5	Mantenimiento	€35	€2	€1	€0,03	€0,02	€96	€94					€134	€131
	Raleo	€42	€2	€2	€0,09	€0,09	€79	€79					€124	€124
6	Mantenimiento		€2	€1	€0,03	€0,02	€93	€91					€95	€92
7	Mantenimiento		€2	€1	€0,03	€0,02	€52	€50					€54	€51
8 - 9	Mantenimiento		€4	€3	€0,05	€0,04	€16	€12					€20	€15
10	Mantenimiento	€21	€2	€1	€0,03	€0,02	€8	€6					€31	€29
	Raleo	€32	€9	€9	€0,36	€0,36	€68	€68	€126				€234	€234
11 - 16	Mantenimiento		€12	€9	€0,15	€0,11	€49	€36					€61	€44
16	Cosecha final	€32	€9	€9	€0,36	€0,36	€51	€51	€126				€217	€218
<b>Total</b>		<b>€312</b>	<b>€259</b>	<b>€188</b>	<b>€602</b>	<b>€579</b>	<b>€5,93</b>	<b>€5,39</b>	<b>€1 748</b>	<b>€1 652</b>	<b>€252</b>		<b>€3 178</b>	<b>€2 990</b>
<b>%</b>		<b>9,8% y 10,4%</b>	<b>8,1%</b>	<b>6,3%</b>	<b>18,9%</b>	<b>19,4%</b>	<b>0,2%</b>	<b>0,2%</b>	<b>55,0%</b>	<b>55,3%</b>	<b>8,4%</b>		<b>100%</b>	<b>100%</b>

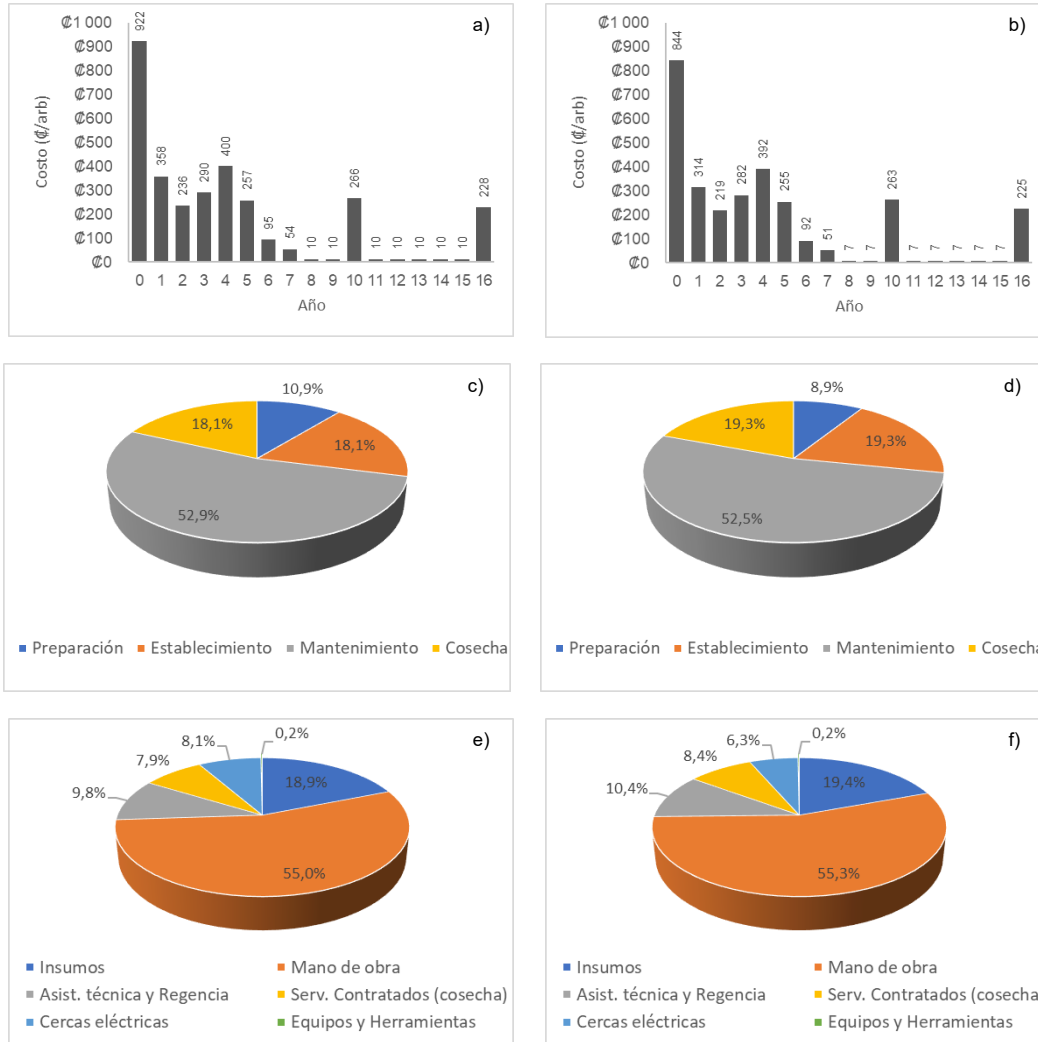
(D1: Diseño SSP 1, D2: Diseño SSP 2)

El costo global por árbol oscila entre US \$4,82 a \$5,16 (diseño 2 y diseño 1 respectivamente), donde más del 55% se debe al costo de la mano de obra. Entre el año 0 y año 1, se registra un costo de €1 281 para diseño 1 y €1 158 para el diseño 2, para ambos casos implica valores

cercanos al 40% del costo total. Si se agrega los costos del año 2, se obtiene casi el 46% de los costos globales del sistema, siendo estos los años de mayor demanda de atención a las necesidades silviculturales.

Puede observarse una leve diferencia en costos entre el diseño 1 (N = 91 árboles en 100m) y el diseño 2 (N = 125 árboles en 100m de franja), explicado por el efecto de la diferencia en la densidad de árboles por unidad de área en cada diseño.

En la figura 3 se presenta la distribución de costos por año, por actividad y por rubro; para las dos alternativas de sistema silvopastoril en franjas (D1 y D2).



**Figura 3.** Distribución del costo anual (a y b) y total en función de la actividad (c y d) y del rubro (e y f), para labores de establecimiento, manejo y cosecha del componente forestal en Sistema Silvopastoril en franjas de teca (diseño 1 izquierda y diseño 2 derecha).

Para ambos diseños la distribución del costo anual (figura 3a y 3b), muestra al año 0 como el de mayor inversión, con valores cercanos al 29% del valor total para ambos diseños, seguido de los años 1, 2, 3, 4, 5, 10 y 16. El alto costo del año 0 se explica por las labores de preparación de franjas, establecimiento de la cerca eléctrica y siembra de árboles. Los años 1 al 4 son relativamente caros producto del mantenimiento inicial, alto control de gramínea y labores silviculturales. Los años 5, 10 y 16 coinciden con las actividades de raleos y cosecha final del paquete tecnológico. Lo que explica su relativo poco peso en el costo total del modelo,

con 8,1%, 8,4% y 7,2% para el diseño 1 y con 8,5%, 8,8% y 7,5% para el diseño 2 respectivamente.

La distribución de costos por actividad para ambos diseños (figura 3b y figura 3c) muestra que las actividades de mantenimiento contabilizan aproximadamente el 52% del costo total por árbol, seguido de las actividades de establecimiento y cosechas.

La distribución del costo total según rubro (figura 3e y figura 3f) mostró una tendencia muy similar para ambos diseños de franja, donde la mano de obra fue el mayor con más del 55%, seguido por los costos de insumos con alrededor del 19%.

La cerca eléctrica resultó ser el rubro de menor costo, con tan solo un 6,3 a un 8,1% del costo global.

Es importante mencionar que el costo combinado de la asistencia técnica y regencia representa aproximadamente un 10% del costo total.

## Discusión

En el ámbito de plantaciones, la gran mayoría de datos tienden a ser expresados en valores por hectárea (González & Reiche, 1996), no obstante, en Sistemas Agroforestales y Silvopastoriles el concepto de arreglo espacial tiende a distorsionar la presentación de la información debido a la gran diversificación en función a los elementos que lo conforman (Bueno, 2012). En SSP se puede identificar algunas variables que modifican la distribución de franjas en la finca, en este caso el tipo de ganadería, la edad de los animales, el tamaño del hato ganadero, tiempos de rotación, tasa de crecimiento del animal, condiciones de sitio, entre otras. Las alternativas de diseño de SSP generadas por Ospino et al. (2020) proponen valores de costo por hectárea, sin embargo se restringe a un único diseño que limita la adaptación a otras opciones de franjas, como las mostradas en esta investigación. Debido a esto, la propuesta de utilizar el árbol como unidad de referencia simplifica la extrapolación de los datos en función del arreglo espacial y la densidad de franjas por finca.

La propuesta de diseño 2 comparada con el diseño 1 optimiza en un 37,4% el uso del espacio y permite con esto, aumentar la cantidad de árboles por unidad de área. Explicado por las hileras de borde donde se plantan los árboles en pareja o dúplex. Como resultado, los costos por árbol con el diseño 2 se ven disminuidos por asociación indirecta a la densidad de árboles unidad de área. No obstante, ambas propuestas de diseño mejoran sustancialmente la versión anterior descrita por Ospino et al. (2020) como mejoras del paquete tecnológico donde se establecían 75 árboles para la misma superficie de franja. Es decir, los diseños 1 y 2 permiten plantar un 21% y 67% más de árboles respectivamente para la misma referencia de área (600 m<sup>2</sup>).

Al comparar las propuestas del diseño SSP en franjas con los sistemas de producción convencional en bloques compactos, se observa que el SSP duplica la capacidad de producción de madera y carbono para la misma superficie de terreno; Por ejemplo, se permite plantar 2083 árboles en un equivalente de 10 000 m<sup>2</sup> para la propuesta de diseño 2. Comparado con una plantación convencional establecida a 3m X 4m con N = 833 árboles. Estos valores significan un aumento de casi 1250 árboles adicionales (150%).

Los costos de establecimiento de cercas eléctricas para las dos alternativas de diseño (Cuadro 2 y Figura 3), son comparables con los costos de cerca planteados para el modelo de alta inversión en la investigación de Ospino et al. (2020). Si se toman los valores de Ospino et al. (2020) el costo por concepto de cerca eléctrica en colones por árbol es alrededor de \$2,46. Mientras que para esta investigación los costos por árbol para cada diseño fueron de \$0,42 y \$0,30 (entre 17 y 12 veces menos). La principal disminución de los costos se debe a la propuesta de una distribución equitativa de costos 50/50, entre la actividad ganadera y la actividad forestal. No obstante, otro de los factores de disminución se debió a una mejor concepción y simplificación del diseño de cerca eléctrica en este estudio, que contribuyó a

reducir significativamente la cantidad de insumos. Como ejemplo, en este estudio se determinó que con el establecimiento de un SSP, es necesario instalar solamente una cerca adicional para lograr el aislamiento de los árboles. En otras investigaciones se propone alternativas de cerca como la utilización de alambre de púa, cerca viva, en madera y barreras de espinas (Toruño et al., 2015) No obstante, se determinó que el tipo de cerca responde al grado de necesidad de protección, por lo tanto, la cerca eléctrica es la alternativa más simple de instalar, con el menor costo, para lograr evitar el ingreso del ganado dentro de la franja con árboles. Así también, existen opciones de movilización de la cerca eléctrica junto con la rotación de los animales, lo que disminuye los costos. Al momento de querer realizar un raleo, eliminación de árboles enfermos o en la cosecha de árboles dentro la franja, la cerca eléctrica es mucho más fácil de desinstalar temporalmente.

En cuanto a costos de asistencia técnica, regencia e informes (Cuadro 3) se determinó el mismo costo para ambas propuestas de diseño, debido a las categorías de clasificación (número de árboles o volumen a cosechar) establecidos por el CIAgro (2021). Como parte del paquete tecnológico se retomó la importancia del profesional forestal como auditor en las buenas prácticas para el desarrollo de la actividad forestal. De esta forma, el programa de asistencia técnicas contempla visitas adicionales en las etapas críticas o más sensibles del desarrollo de esta modalidad de cultivo de árboles. En comparación con. Ospino et al. (2020) esta investigación propone 2,6 veces más costos, justificado por las visitas adicionales, concepto de viáticos y respectivos valores de inscripción de los informes técnicos.

La utilización de equipos y herramienta (Cuadro 4) posee un patrón de uso regular y continuo a lo largo del ciclo de producción. Con excepción de la hoyadora (únicamente durante el establecimiento), la utilización de otros equipos son similares a lo propuesto en el modelo SSP de Ospino et al. (2020), o para el modelo de plantación convencional como lo reporta recientemente Vallejos (2019). A pesar de esto, en esta investigación se optimizó la cantidad de jornales para la utilización de equipo y se evidencia una diferencia en términos de costos con las otras investigaciones. En este estudio se incorpora una mejora tecnológica con el uso del hoyado mecánico que representa un nuevo costo para el modelo, pero que también sustituye algunas actividades de mecanización del suelo y labores de hoyado manual tradicional, por su mayor efectividad y rendimiento (Rivera, 2017).

Los insumos descritos en las actividades de este modelo de cultivo de teca en SSP (Cuadro 5), se pueden considerar de uso convencional a lo utilizado en plantaciones forestales (Ospino et al., 2020; Vallejos, 2019). Sin embargo, pueden presentarse discrepancias en cuanto al costo por insumos con otros modelos, debido a la volatilidad en los precios en los insumos agropecuarios durante los dos últimos años, debido a la pandemia, a la inflación, a la escasez de productos con el conflicto internacional de transporte de las navieras (Barroso et al., 2022), así como a la presencia de productos sustitutos y cambios en la dosis o cantidad de los productos

Los resultados del modelo de costos (Cuadro 6) muestra que el costo total de producción de teca en franjas de SSP, incluyendo el costo de la cerca eléctrica son de  $\text{C}\$3\ 179\ \text{arb}^{-1}$  para el diseño 1 y de  $\text{C}\$2\ 990\ \text{arb}^{-1}$  para el diseño 2, con una diferencia de un 6%. Esta diferencia entre el costo de producción entre los diseños de franja se explica por el efecto del prorrateo con la mayor cantidad de árboles por unidad de área en el diseño 2. Esto es particularmente evidente en actividades como el control de malezas, donde hay una mayor cantidad de árboles en la misma superficie en el segundo diseño.

Una hectárea convencional reforestada en bloque equivale en superficie a 1 667 metros lineales de franja (6m de ancho X 1 667m de largo  $\approx 10\ 000\ \text{m}^2$ ). Sin embargo, con los diseños 1 y 2 de SSP, en esta misma superficie de franja es posible plantar 1 517 y 2 083 árboles respectivamente. Si se relaciona esta cantidad de árboles con el costo por árbol respectivo a cada diseño, se obtiene que el costo de una hectárea equivalente en franjas de SSP corresponde a  $\text{C}\$4\ 821\ 642$  y  $\text{C}\$6\ 229\ 430$  respectivamente. El costo de producción de teca en

plantación forestal en bloque compacto convencional, con un distanciamiento de 3m X 4m (833 arb/ha), es de aproximadamente \$6 705,24 (¢4 157 267) (Gamboa & Murillo, 2022). Este costo global equivale a un costo por árbol de ¢4 991 arb<sup>-1</sup>. Mientras que el costo por árbol cultivado en un SSP con los diseños 1 y 2, es de un 36,3% y un 40% menor respectivamente. Además del menor costo de producción de madera en estos diseños de SSP en franjas, se espera una mayor tasa de crecimiento de los árboles debido al efecto de borde (Rodríguez et al., 2011).

Al igual que otras investigaciones sobre modelos de costos para las actividades forestales (Figura 3), se destaca que las actividades de mantenimiento acaparan la mayor proporción del costo global. Esto se debe a que durante los dos primeros años se requiere de una inversión alta en el control de malezas, principalmente control de gramínea producto de la cercanía con el repasto. En las Figuras 3a y 3b se identifica los años pico en términos de mayor inversión, que coinciden con las actividades de establecimiento y cosecha. Es probable que el diseño 2 por su mayor densidad de siembra, logre un control inicial de malezas más temprano, lo cual se vea reflejado en una disminución en los costos de producción.

### Conclusiones

Los costos por árbol para la producción de teca durante 16 años, en las dos alternativas de sistema silvopastoril, son de ¢3 178 (\$5,16) para el diseño 1 y ¢2 990 (\$4,82) para diseño 2. Para ambos diseños los tres primeros años acumulan entre un 46 y un 48% del costo global de producción.

Las actividades de mantenimiento son las que contabilizan el mayor costo de producción con poco más del 52% del costo global.

La mano de obra es el rubro que representa el mayor costo del modelo con más del 55%, seguido de un 19% de costos de los insumos.

La cerca eléctrica es el rubro de menor costo con un 6,3% a un 8,1% del costo total.

El costo combinado de la asistencia técnica y regencia representan alrededor de un 10% del costo global.

Para una misma superficie equivalente a 10000 m<sup>2</sup> de una ha en plantación forestal convencional, los diseños SSP en franjas pueden plantar entre 1500 y 2080 árboles (180 y 250%).

Ambos diseños SSP son 36,3% y 40,1% más económicos que plantar y producir teca en una plantación convencional en bloque.

### Referencias

- Barroso, G. M., Duque, T. S., Custódio, I. G., Leite, M. L. F., Corrêa, J. M., Silva, D. V., Júnior, A. P. B., da Silva, F. D., & dos Santos, J. B. (2022). Expansion of Planted Forests: The Risk of Pesticides Mixtures. *Forests*, 13(1), 50. <https://doi.org/10.3390/f13010050>
- Bueno, G. (2012). Sistemas silvopastoriles, arreglos y usos. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 3(2), 56–83. <https://doi.org/10.22579/22484817.604>
- Caja Costarricense de Seguro Social. (2021). *Calculadora Patronal*. <https://www.ccss.sa.cr/calculadora>
- Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica. (2021). *Montos de inscripción y honorarios ajustados a hora profesional vigente a partir de 08/02/2021*. <http://www.ing-agronomos.or.cr/index.php/component/content/category/69-registros.html>
- Fallas, J. L. (2018). *Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de Teca (Tectona grandis L.f) en Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Gamboa, J. P., & Murillo, O. (2022). *Informe Final: Auditoría Valoración del Activo Biológico de MLR Forestal de Nicaragua S.A.*
- González, M., & Reiche, C. (1996). *Costos de establecimiento y manejo de plantaciones*

- forestales y sistemas agroforestales en Costa Rica*. CATIE.
- Guevara, M., & Murillo, O. (2009). Costos y rendimientos de ocho tipos de poda en plantaciones jóvenes de *Acacia mangium* Willd en la zona norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 6(17), pág. 51-57.
- Guevara, M., & Murillo, O. (2020). Productividad, costos y calidad de ejecución del primer raleo en plantaciones de *Acacia mangium* Willd en la zona norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kuru*, 18(42), 55–61. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i42.5539>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2014). *Resumen ejecutivo: Resultados Generales IV Censo Nacional Agropecuario*. <https://doi.org/10.18356/f4ca5e90-es>
- Instituto Nacional de Seguros. (2021). *Seguros Costa Rica*. <https://www.grupoinc.com/>
- MAG, CORFOGA, INTA, CNPL, & PNUD. (2017). *Manual Operativo del piloto Nacional del NAMA Ganadería. Segunda edición*. [www.fb.com/namaganaderia](http://www.fb.com/namaganaderia)
- Méndez, E., Beer, J., Faustino, J., & Otárola, A. (2000). *Plantación de árboles en línea* (2a ed.). CATIE.
- Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. (2021). *Lista de salarios 2021*. <https://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/lista-salarios.html>
- Murgueitio, E., & Ibrahim, M. (2004). Ganadería y medio ambiente en América Latina. *XII Congreso Venezolano de Producción e Industria Animal 2004*, 6.
- Murillo, O. (2022). *Programa para la estimación del volumen comercial y valor de la plantación forestal* (Mayo 2022). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ing. Forestal.
- Murillo, O., & Badilla, Y. (2015). *Informe Final de Consultoría: Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago de servicios ambientales para la medición de la biomasa, para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono*.
- Murillo, O., Badilla, Y., Rojas, F., Torres, G., Carvajal, D., & Canessa, R. (2015). *Cultivo de especies maderables nativas de alto valor para pequeños y medianos productores*.
- Murillo, O., Leitón, M., Ospino, M., Badilla, Y., Paniagua, W., & Valverde, A. (2015). Hacia un nuevo sistema silvopastoril. *Revista Germinar*, 17(5), 16–17.
- Murillo, O., Paniagua, W., Badilla, Y., Rojas, A., Arce, J., & Corea, E. (2013). *Modelo silvopastoril orientado a la reducción de la huella de carbono y al aumento de la productividad económica*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2010). *Resultados: Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM)*. FAO. <https://www.fao.org/gleam/results/es/#top>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2014). *Programa mundial para una ganadería sostenible. Reporte del 24° período de sesiones del Comité de agricultura*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2016). *Síntesis – Ganadería y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Programa Mundial de Ganadería Sostenible*. 13. [http://www.livestockdialogue.org/fileadmin/templates/res\\_livestock/docs/2016/Panama/FAO-AGAL\\_synthesis\\_Panama\\_Livestock\\_and\\_SDGs\\_SP.pdf](http://www.livestockdialogue.org/fileadmin/templates/res_livestock/docs/2016/Panama/FAO-AGAL_synthesis_Panama_Livestock_and_SDGs_SP.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2022). *Producción animal - El papel de la FAO en la producción animal*. FAO. <https://www.fao.org/animal-production/es>
- Ospino, M., Badilla, Y., Paniagua, W., Campos, C., & Murillo, O. (2020). Costos de producción de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en sistemas silvopastoriles de la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 44(2), 155–173. <https://doi.org/10.15517/rac.v44i2.43109>
- Ospino, M., Murillo, O., & Alfaro, M. (2022). Análisis financiero y de escenarios de financiamiento del componente forestal en sistemas silvopastoriles. *Revista Forestal*

- Mesoamericana Kurú*, 19(45), 28–37. <https://doi.org/10.18845/RFMK.V19I45.6323>
- Ospino, Mónica, Badilla, Y., Paniagua, W., Campos, C., & Murillo, O. (2020). Costos de producción de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en sistemas silvopastoriles de la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 44(2), 155–173. <https://doi.org/10.15517/rac.v44i2.43109>
- Paniagua, W., Murillo, O., Mora, M. ., Ospino, M., Valverde, A., Badilla, Y., Rojas, A., Campos, C., & Corea, E. (2018). *Sistemas silvopastoriles con árboles maderables de alto valor económico* (Manual). Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Rivera, J. (2017). *Estudio de factibilidad técnico y económico del hoyado mecanizado y manual en suelos forestales del departamento del Valle del Cauca*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Rodríguez, L., Lozada, R., Mora, A., & Lugo, L. (2011). Efecto de borde en sistemas de enriquecimiento en fajas, Reserva Forestal Imataca, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 55(1), 61–73.
- Toruño, I., Mena, M., & Guharay, F. (2015). *Establecimiento y manejo de Sistemas Silvopastoriles*. Catholic Relief Services.
- Vallejos, J. (2019). *Cultivo de madera de pilón (Hyeronima alchorneoides Allemão) en Costa Rica*. Tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

## **4. Análisis financiero para el cultivo de teca (*Tectona grandis* Linn f.) en sistema silvopastoril**

**Jiménez-Jiménez Joshua  
Salas Cynthia  
Murillo, Olman  
Badilla, Yorleny**

### **Resumen**

El sector ganadero en Costa Rica se conforma mayoritariamente por pequeños y medianos productores, que hoy día se encuentra ante grandes desafíos económicos y ambientales que convergen en una demanda de soluciones y alternativas. Se requiere adoptar estrategias para reconvertir la actividad en una ganadería baja en carbono, requisito esencial para lograr el acceso de nuevos mercados. La estrategia de los sistemas silvopastoriles (SSP) pretende generar una sinergia entre el sector ganadero y forestal para maximizar la sostenibilidad. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la rentabilidad financiera del cultivo de madera de teca en un diseño de franjas en SSP. Como parte del estudio se investigó varios escenarios de financiamiento, basado en la venta de madera y la posibilidad de incentivos por PSA (Pago por Servicios Ambientales). La rentabilidad fue evaluada mediante los indicadores financieros Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) y Relación Beneficio Costo (B/C). Así también, fue incluido un análisis de sensibilidad para cada escenario investigado. Los resultados indican que el cultivo de madera en franjas de SSP es altamente rentable. Para todos los escenarios evaluados los indicadores son positivos y superiores al valor de referencia. El PSA es un plus económico y mejora los indicadores financieros, mientras que los costos y beneficios son sensibles a los cambios. El mejor escenario se obtuvo con financiamiento con capital propio con venta de madera internacional y con el aporte del PSA por parte del Fondo de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), que genera un VAN de \$21 536, una R(B/C) de 3,74 y una TIRM de 18,4%. Mientras que el peor escenario fue con financiamiento propio pero con venta de la madera en el mercado local, que generó un VAN de \$7 070, una R(B/C) de 1,90% y una TIRM de 12,5%.

**Palabras Clave:** Sensibilidad, economía forestal, plantaciones, Pago por Servicios Ambientales, Agroforestería

### **Abstract**

The livestock sector in Costa Rica is mostly conformed by small and medium-sized producers,



who today face major economic and environmental challenges, that demand solutions and options. There is a need for the adoption of strategies to convert the activity into a low-carbon livestock industry, an essential requirement to overcome the access into new markets. The silvopastoral systems (SSP) strategy aims to generate a synergy between the livestock and forestry sectors to maximize sustainability. The objective of this research was to evaluate the financial profitability of teak wood cultivation in a strip design in SSP. As part of the study, several financing scenarios were investigated, based on timber sales and the possibility of PES (Payment for Environmental Services) incentives. Profitability was evaluated using the financial indicators Net Present Value (NPV), Modified Internal Rate of Return (MIRR) and Benefit-Cost Ratio (B/C). A sensitivity analysis was also included for each scenario investigated. The results indicate that the cultivation of timber in SSP strips is highly profitable. For all the scenarios evaluated, the indicators are positive and higher than the reference value. ESP (Environmental Services Payment) is an economic plus and improves financial indicators, while costs and benefits are sensitive to changes. The best scenario was obtained with financing with international timber sales and with the PES contribution from the Forestry Financing Fund (FONAFIFO), which generates an NPV of \$21,536, an R(B/C) of 3.74 and an IRRM of 18.4%. The worst scenario was obtained with self-financing but with timber sales on the local market, which generates an NPV of \$7,070, an R(B/C) of 1.90% and an IRRM of 12.5%.

**Key words:** forest economy, sensitivity, plantations, Environmental Services Payment, Agroforestry

## Introducción

En Costa Rica aproximadamente el 37% de la superficie del país es destinada a la actividad ganadera [1]; para el VI Censo Nacional Agropecuario del año 2014 se identificó que dicho sector lo conforman un aproximado de 37 171 fincas, ~~mismas~~ que en su mayoría pertenecen a pequeños (<20 ha) y mediano productores (<50 ha) [2]. La pandemia generó repercusiones económicas en la actividad, sin embargo el sector pecuario fue capaz de contribuir aproximadamente con un 1% del PIB [3]. El sector agropecuario fue el segundo generador de empleo con un aporte del 12,8% de la población empleada del país [4]. Sin duda alguna, es uno de los sectores de mayor importancia para el desarrollo rural del país.

Sin embargo, la ganadería es una de las actividades que genera mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), producto de la fermentación entérica [5], que representan el 18,5% de las emisiones netas a nivel nacional [6]. Es por esto que iniciativas como NAMA ganadería buscan desarrollar estrategias para alcanzar una actividad baja en carbono [5]. Por lo tanto, la promoción de prácticas silvopastoriles posiciona al componente forestal como elemento clave para la generación de sumideros de carbono en esta actividad. La base conceptual de los Sistemas Silvopastoriles (SSP) se encuentra apoyada sobre la asociación de la actividad ganadera con la actividad forestal. No obstante, la posibilidad de arreglos espaciales pueden ser múltiples como la cerca viva, el banco forrajero, árboles

dispersos en potrero, pastura dentro de plantaciones forestales, lindero de finca o cortina rompevientos [7], [8]. Sin embargo, la mayor parte de estas alternativas a pesar de presentar una contribución a nivel ecosistémico, no contribuyen con un impacto significativo a la economía del productor. Si se analiza un sistema silvopastoril como la convergencia de dos actividades económicas, casi ninguna de las opciones tradicionales involucra verdaderamente al componente forestal, tal y como fue propuesto por Murillo [9]. Este consiste en un diseño que permite la inclusión de árboles en franjas de especies forestales de alto valor, intercaladas dentro de la unidad de producción pecuaria. Cuyo propósito es desarrollar un sistema que logre armonizar el negocio pecuario con el del cultivo de madera de alto valor y a su vez, aumentar la compensación de las emisiones de gases efecto invernadero.

La ~~optimización~~ introducción de un componente forestal en la finca ganadera, con fines productivos y de reducción de la huella de carbono, es la clave para potenciar el beneficio económico y ambiental del SSP [9]. No obstante, existen barreras que impiden la adopción de SSP bajo estos términos, como limitaciones de financiamiento, falta de conocimiento o de información técnica en temas silviculturales, entre otros [8], [10], [11]. Existe al respecto poca experiencia con información relacionada con aspectos económicos en SSP donde se integre la producción de madera con la ganadería [12], [13].

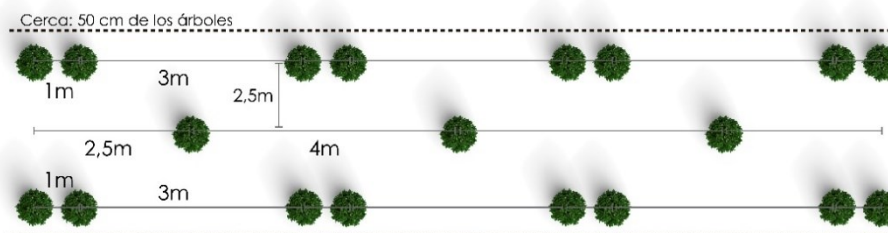
Por lo tanto, esta investigación realizó una investigación financiera para el cultivo de madera de teca en una alternativa de diseño de sistema silvopastoril con árboles dispuestos en franjas [14]. Como objetivo se evaluó la rentabilidad financiera de varios escenarios, que contemplaron alternativas de capital de inversión, mercado para venta de madera y adopción de incentivos por PSA.

## **Metodología**

Para la creación del análisis financiero se utilizó como base el modelo de costos desarrollado para árboles individuales [14], en franjas de sistemas silvopastoriles (SSP). Este modelo incorpora los árboles maderables en arreglos espaciales asociados con la división de apartos de pastoreo, para cercas, colindancias o linderos. El modelo de costos por árbol utilizado [14], es robusto, actualizado, contempla todos los rubros usuales del cultivo moderno de madera (insumos, jornales, herramientas, asistencia técnica, etc) y permite una mayor flexibilidad de adopción para cualquier densidad de plantación o arreglo espacial deseado.

El diseño espacial en desarrollo en varias regiones del país consiste en una franja de 6 metros de ancho con 3 hileras internas de árboles separadas a 2,5 m, con 0,5 m de cada lado de distancia con la cerca. En las dos hileras de borde los árboles se plantan a cada 4 m en

parejas, separadas por 1 m entre ellos. Mientras que en la hilera del centro, el árbol se planta a cada 4m (Figura 1).



**Figura 4.** Diseño de franjas del sistema silvopastoril (n en 100m = 125).

Esta distribución de individuos permite plantar 125 árboles por cada 100 m lineales de franja. Para relacionar los datos con una unidad de superficie, 1 hectárea reforestada en bloque (10 000 m<sup>2</sup>) equivale aproximadamente a 1667 m lineales de franja (6 m x 1667 m ≈ 10 000 m<sup>2</sup>), pero en este diseño SSP se logra aumentar la densidad de árboles hasta poder albergar alrededor de 2083 árboles.

Basado en el modelo de costos de SSP [14] se estableció una proyección de ingresos esperados en función del volumen proyectado para 2083 árboles. Para el análisis de la producción esperada se utilizó el software para avalúos de plantaciones forestales [15], donde la estimación de volumen comercial se basó en el modelo alométrico para teca ajustado por Fallas [16]. La estimación de la madera a obtener en cada raleo y cosecha se basó en los parámetros como se muestra en el cuadro 1.

**Cuadro 1** Estimación del rendimiento de los raleos y cosecha final de árboles

Cosechas	Edad	DAP promedio (cm)	Intensidad de raleo	Trozas por árbol (2,3m)	Calidad de trozas
I Raleo	5	(25% < al modelo)	40% (25% con valor comercial)	3	T1 =1, T2 = 2, T3 = 3
II Raleo	10	(20% < al modelo)	30%	4	T1 = 1, T2 y T3 = 2, T4 = 3
Cosecha final	16		30%	5	T1 a T3 = 1; T4 y T5 = 2

Con base en la función de volumen comercial se creó un cuadro de madera esperada (m<sup>3</sup>/ha) y flujo de ingresos, acorde con el valor de venta nacional e internacional para los productos de raleos y cosecha final (Cuadro 2). El ciclo de producción de madera fue fijado para un plazo

de 16 años, bajo la premisa de una tasa de crecimiento ligeramente mayor por el efecto de borde de los árboles en el sistema de producción en franja del diseño SSP.

El precio nacional promedio de venta de madera en troza fue tomado del reporte anual de la Oficina Nacional Forestal (ONF) para el primer semestre 2021, según su categoría diamétrica [13]. Mientras que el precio de venta internacional fue tomado de cotizaciones de compra de madera que ofrecen empresas asiáticas comercializadoras de teca. El mercado internacional de madera de teca particularmente se caracteriza por su susceptibilidad a diferenciación en precios en función de la categoría diamétrica y largo de troza. Por tanto, se reclasificó los ingresos esperados según tres tipos de producto (tarima, aserrío delgado y aserrío grueso). La venta nacional posee deducciones obligatorias por impuesto al valor agregado (IVA<sup>1</sup>).

**Cuadro 2.** Ingreso esperado por venta de madera de teca (*Tectona grandis* Linn f) para una hectárea equivalente en sistema silvopastoril con N = 2083 árboles, producto del diseño en franjas [14].

<b>Rubro</b>		<b>I Raleo</b>	<b>II Raleo</b>	<b>Cosecha final</b>	
<b>Edad</b>		5	10	16	
<b>N° a extraer</b>		625	499	500	
<b>dap</b>		14,96	24,59	34,49	
<b>N° trozas por árbol</b>		3	4	6	
<b>Calidad promedio de troza por árbol</b>		1+2+3+	1+2+2+3	1+1+2+2	
<b>Rubro</b>		<b>Volumen m<sup>3</sup></b>			<b>Total</b>
<b>Tarima</b>		15,21	44,45	N/A	59,66
<b>Aserrío delgado</b>		N/A	38,98	33,84	72,82
<b>Aserrío grueso</b>		N/A	N/A	165,50	165,50
<b>Rubro</b>		<b>Ingresos \$</b>			<b>Total</b>
<b>Tarima</b>	<b>Nacional</b>	\$838	\$2 449	N/A	<b>\$3 287</b>
	<b>Internacional</b>	\$838	\$2 449	N/A	<b>\$3 287</b>
<b>Aserrío delgado</b>	<b>Nacional</b>	N/A	\$4 258	\$3 697	<b>\$7 955</b>
	<b>Internacional</b>	N/A	\$9 744	\$8 461	<b>\$18 205</b>
<b>Aserrío grueso</b>	<b>Nacional</b>	N/A	N/A	\$27 356	<b>\$27 356</b>
	<b>Internacional</b>	N/A	N/A	\$53 381	<b>\$53 381</b>
<b>Total</b>	<b>Nacional</b>	<b>\$838</b>	<b>\$6 707</b>	<b>\$31 053</b>	<b>\$38 598</b>
	<b>Internacional</b>	<b>\$722</b>	<b>\$11 365</b>	<b>\$61 841</b>	<b>\$73 928</b>

Para el análisis financiero, la proyección de ingresos esperados a valor futuro fue estandarizada mediante la dolarización, a una tasa de cambio promedio de ₡620 representativo para el segundo cuatrimestre del 2021 [17]. Posteriormente se crearon flujos

<sup>1</sup> De acuerdo con el párrafo tercero del artículo 42 de la Ley Forestal N° 7575 del 13 de febrero de 1996.

de caja para cada escenario, donde se muestra la diferencia entre costos e ingresos para obtener un ingreso neto por año y del total del ciclo de producción [18].

Para la evaluación de rentabilidad se calculó el valor actual neto (VAN), tasa Interna de retorno modificada (TIRM o TUR), y la relación beneficio costo (B/C).

Se utilizó la TIRM como sustituto de la TIR convencional ya que los proyectos presentan un flujo de fondos no convencionales. La TIRM se define como método de valoración de inversión para casos con flujo de caja con fluctuaciones de signo en múltiples ocasiones considera la reinversión de los flujos incrementales de fondos aportados por el proyecto [19], [20].

Se utilizó una tasa de Interés de oportunidad del 7,5%, misma que se definió como 2,5 puntos de holgura positiva sobre el valor de tasa de interés especificado para la opción de crédito ofrecido por FONAFIFO [21] en proyectos silvopastoriles.

Con el objetivo de buscar ampliar alternativas para un productor se evaluó un total de seis escenarios, donde se incluyó opciones de financiamiento ofrecidas por FONAFIFO y posibles ingresos, tanto por madera como por el Pago por Servicios Ambientales (PSA) como actividad agroforestal.

Escenario I: Capital de inversión propio + ingreso por venta de madera en mercado internacional.

Escenario II: Capital de inversión propio + ingreso por PSA + ingreso por venta de madera en mercado internacional.

Escenario III: Crédito de inversión + ingreso por PSA + ingreso de venta de madera en mercado internacional.

Escenario IV: Capital de inversión propio + ingreso de venta de madera en mercado nacional.

Escenario V: Capital de inversión propio + ingreso de PSA + ingreso por venta de madera en mercado nacional.

Escenario VI: Crédito de inversión + ingreso por PSA + ingreso por venta de madera en mercado nacional.

Para los escenarios 3 y 6 que contemplaron la cobertura de costos con el crédito ofrecido por FONAFIFO, se detalla las características del contrato de financiamiento [22],[21]:

- 1- Tasa fija del 5%.
- 2- Garantía fiduciaria.
- 3- Monto de ₡1 800/árbol con un tope de crédito de hasta un máximo de ₡5 000 000 por contrato.
- 4- Pago anual de capital y de intereses.
- 5- Plazo de crédito de hasta 10 años.

- 6- Amortizaciones parciales con ventas de madera de raleos y con cosecha final
- 7- Desembolso del crédito en tres tramos: primer año 60% (30% para preparación, establecimiento y mantenimiento), 30% para mantenimiento), segundo año 20% (mantenimiento y manejo), tercer año 20% (mantenimiento y manejo).

Además de estas características del crédito, los escenarios 3 y 6 contemplan el PSA como ingreso adicional y mecanismo de amortización parcial al monto principal del crédito. El monto de PSA en Actividad Sistema Agroforestal corresponde a ₡1 491/árbol (\$2,4/árbol) en desembolsos de dos tramos, el primero en año 3 del 80% y el segundo en el año 5 del 20% [23].

Como análisis de sensibilidad para cada escenario se ajustó un modelo de regresión que explicara el comportamiento de la TIRM ante los cambios porcentuales en el flujo de costo o beneficio.

## Resultados

Escenario 1: capital de inversión propia más ingreso por venta de madera en el mercado internacional.

Los primeros nueve años se registra un flujo de fondos negativo, el ingreso por concepto de primer raleo en el año 5 no logra compensar los costos y su balance es también negativo. El balance neto positivo se obtuvo a partir del segundo raleo, con un valor de \$10 481 y de \$61 085 para la cosecha final. La estimación del ingreso neto total al final del ciclo de producción es de \$63 884 (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Flujo de caja para el escenario 1 de financiamiento para la producción de madera de *Tectona grandis* Linn f. (teca) en sistemas silvopastoril con diseño en franjas arbóreas equivalente a una hectárea (N = 2083).

Año	Costos Operativos (\$/ha)	Ingreso Madera (\$/ha)	Ingreso neto (\$/ha)
0	\$2 835		-\$2 835
1	\$1 056		-\$1 056
2	\$737		-\$737
3	\$948		-\$948
4	\$1 316		-\$1 316
5	\$856	\$722	-\$134
6	\$310		-\$310
7	\$173		-\$173
8	\$25		-\$25
9	\$25		-\$25
10	\$884	\$11 365	\$10 481
11	\$25		-\$25
12	\$25		-\$25
13	\$25		-\$25
14	\$25		-\$25

15	\$25		-\$25
16	\$756	\$61 841	\$61 085
<b>Total</b>	<b>\$10 044</b>	<b>\$73 928</b>	<b>\$63 884</b>

Escenario II: capital de inversión propia más ingreso por venta de madera en mercado internacional y PSA.

Los primeros nueve años se registra un flujo de fondos negativo con excepción del tercer año por concepto de ingreso de PSA, con un ingreso neto positivo de \$3 060. El ingreso por concepto de primer raleo y PSA en el año 5 logra compensar los costos y su balance es positivo con \$868. El balance neto positivo de importancia se registra hasta el segundo raleo al año 10, con \$10 481 y luego de \$61 085 para la cosecha final. La estimación del ingreso neto total al final del ciclo de producción es de \$68 893 (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Flujo de caja para el escenario 2 de financiamiento para la producción de madera de *Tectona grandis* Linn f. (teca) en sistemas silvopastoril con diseño en franjas arbóreas equivalente a una hectárea (N = 2083).

Año	Costo Operativo (\$/ha)	Ingreso (\$/ha)	PSA Ingreso (\$/ha)	Madera Ingreso (\$/ha)	total Ingreso neto (\$/ha)
0	\$2 835				-\$2 835
1	\$1 056				-\$1 056
2	\$737				-\$737
3	\$948	\$4 007		\$4 007	\$3 060
4	\$1 316				-\$1 316
5	\$856	\$1 002	\$722	\$1723	\$868
6	\$310				-\$310
7	\$173				-\$173
8	\$25				-\$25
9	\$25				-\$25
10	\$884		\$11 365	\$11 365	\$10 481
11	\$25				-\$25
12	\$25				-\$25
13	\$25				-\$25
14	\$25				-\$25
15	\$25				-\$25
16	\$756		\$61 841	\$61 841	\$61 085
<b>Total</b>	<b>\$10 044</b>	<b>\$5 009</b>	<b>\$73 928</b>	<b>\$78 937</b>	<b>\$68 893</b>

Escenario III: Crédito de inversión con ingresos por venta de madera en el mercado internacional y por el PSA.

Los primeros nueve años se registra un flujo de fondos negativo. En los años 2 y 5 se registran ingresos del PSA, pero no logran compensar los costos operativos. El ingreso por concepto del primer raleo en el año 5 no logra compensar los costos y su balance es negativo. El balance neto positivo se observa hasta el segundo raleo al año 10, por \$10 148 y un balance

de \$61 085 la cosecha final. Por tanto, la estimación del ingreso neto total al final del ciclo de producción fue de \$62 139 (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Flujo de caja para el escenario 3 de financiamiento para la producción de madera de *Tectona grandis* Linn f. (teca) en sistema silvopastoril con diseño en franjas arbóreas equivalente a una hectárea (N = 2083).

Año	Costo Operativo (\$/ha)	Costo Crédito (\$/ha)	Costo Total (\$/ha)	Ingreso (\$/ha)	PSA	Ingreso Madera (\$/ha)	Ingreso Total (\$/ha)	Ingreso neto (\$/ha)
0	\$2 835		\$2 835					-\$2 835
1	\$1 056		\$1 056					-\$1 056
2	\$737	\$181	\$918					-\$918
3	\$948	\$4 249	\$5 197	\$4 007			\$4 007	-\$1 190
4	\$1 316	\$102	\$1 418					-\$1 418
5	\$856	\$1 825	\$2 681	\$1 002		\$722	\$1 723	-\$958
6	\$310	\$16	\$325					-\$325
7	\$173	\$16	\$189					-\$189
8	\$25	\$16	\$41					-\$41
9	\$25	\$16	\$41					-\$41
10	\$884	\$332	\$1 216			\$11 365	\$11 365	\$10 148
11	\$25		\$25					-\$25
12	\$25		\$25					-\$25
13	\$25		\$25					-\$25
14	\$25		\$25					-\$25
15	\$25		\$25					-\$25
16	\$756		\$756			\$61 841	\$61 841	\$61 085
<b>Total</b>	<b>\$10 044</b>	<b>\$6 754</b>	<b>\$16 798</b>	<b>\$5 009</b>		<b>\$73 928</b>	<b>\$78 937</b>	<b>\$62 139</b>

Escenario IV: capital de inversión propia más ingreso por venta de madera en mercado nacional.

Los primeros cuatro años se registra un flujo de fondos negativo. El ingreso por concepto de primer raleo en el año 5 apenas logra superar los costos con un pequeño balance positivo de \$63. El balance correspondiente al segundo raleo es de \$6 472 y de \$33 302 para la cosecha final. La estimación del ingreso neto total al final del ciclo de producción es de \$32 289 (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Flujo de caja para el escenario 4 de financiamiento para la producción de madera de *Tectona grandis* Linn f. (teca) en sistemas silvopastoril con diseño de franjas arbóreas equivalentes a una hectárea (N = 2083).

Año	Costo Operativo (\$/ha)	Ingreso Madera (\$/ha)	Ingreso neto (\$/ha)
0	\$2 835		-\$2 835
1	\$1 056		-\$1 056
2	\$737		-\$737
3	\$948		-\$948
4	\$1 316		-\$1 316
5	\$856	\$919	\$63
6	\$310		-\$310
7	\$173		-\$173



8	\$25		-\$25
9	\$25		-\$25
10	\$884	\$7 356	\$6 472
11	\$25		-\$25
12	\$25		-\$25
13	\$25		-\$25
14	\$25		-\$25
15	\$25		-\$25
16	\$756	\$34 058	\$33 302
<b>Total</b>	<b>\$10 044</b>	<b>\$42 333</b>	<b>\$32 289</b>

Escenario V: capital de inversión propia más venta de madera en mercado Nacional y PSA.

El primer registro de ingresos positivos en el flujo de fondo se visualiza en el tercer año debido al ingreso del PSA con un valor de \$3 060. El ingreso por concepto de primer raleo junto con el ingreso por PSA en el año 5 logra sobrepasar la compensación de los costos con un balance positivo de \$1 065. El balance es positivo de nuevo con el segundo raleo al año 10, por un monto de \$6 472 y finalmente de \$33 302 con la cosecha final. La estimación del ingreso neto total al final del ciclo de producción es de \$37 298 (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Flujo de caja para el escenario 5 de financiamiento para la producción de madera de *Tectona grandis* Linn f. (teca) en sistema silvopastoril con diseño de franjas arbóreas equivalentes a una hectárea (N = 2083).

Año	Costo Operativo (\$/ha)	Ingreso (\$/ha)	PSA Ingreso (\$/ha)	Madera Ingreso (\$/ha)	Total Ingreso (\$/ha)	neto (\$/ha)
0	\$2 835					-\$2 835
1	\$1 056					-\$1 056
2	\$737					-\$737
3	\$948	\$4 007			\$4 007	\$3 060
4	\$1 316					-\$1 316
5	\$856	\$1 002	\$919		\$1 921	\$1 065
6	\$310					-\$310
7	\$173					-\$173
8	\$25					-\$25
9	\$25					-\$25
10	\$884		\$7 356		\$7 356	\$6 472
11	\$25					-\$25
12	\$25					-\$25
13	\$25					-\$25
14	\$25					-\$25
15	\$25					-\$25
16	\$756		\$34 058		\$34 058	\$33 302
<b>Total</b>	<b>\$10 044</b>	<b>\$5 009</b>	<b>\$42 333</b>		<b>\$47 342</b>	<b>\$37 298</b>

Escenario VI: crédito de inversión más venta de madera en mercado Nacional y PSA.

Los primeros nueve años se registra un flujo de fondos negativo. Los ingresos por PSA en año 3 y 5 no logra superar los costos del sistema silvopastoril en esos años. Similar resultado ocurre con el ingreso por madera producto del primer raleo en el año 5, que no logra

compensar los costos y su balance es negativo. El balance neto positivo se registra a partir del segundo raleo (año 10) por un monto de \$6 347y en la cosecha final por \$33 302. La estimación del ingreso neto total al final del ciclo de producción es de \$30 594 (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Flujo de caja para el escenario 6 de financiamiento para la producción de madera de *Tectona grandis Linn f.* (teca) en sistemas silvopastoril con diseño en franjas arbóreas equivalentes a una hectárea (N = 2083).

Año	Costo Operativo (\$/ha)	Costo Crédito (\$/ha)	Costo total (\$/ha)	Ingresos PSA (\$/ha)	Ingreso Madera (\$/ha)	Ingreso Total (\$/ha)	Ingreso neto (\$/ha)
0	\$2 835		\$2 835				-\$2 835
1	\$1 056		\$1 056				-\$1 056
2	\$737	\$181	\$918				-\$918
3	\$948	\$4 249	\$5 197	4 007		\$4 007	-\$1 190
4	\$1 316	\$102	\$1 418				-\$1 418
5	\$856	\$2 023	\$2 879	\$1 002	\$919	\$1 921	-\$958
6	\$310	\$6	\$316				-\$316
7	\$173	\$6	\$179				-\$179
8	\$25	\$6	\$31				-\$31
9	\$25	\$6	\$31				-\$31
10	\$884	\$125	\$1 009		\$7 356	\$7 356	\$6 347
11	\$25		\$25				-\$25
12	\$25		\$25				-\$25
13	\$25		\$25				-\$25
14	\$25		\$25				-\$25
15	\$25		\$25				-\$25
16	\$756		\$756		\$34 058	\$34 058	\$33 302
<b>Total</b>	<b>\$10 044</b>	<b>\$6 705</b>	<b>\$16 748</b>	<b>\$5 009</b>	<b>\$42 333</b>	<b>\$47 342</b>	<b>\$30 594</b>

### Indicadores Financieros

En todos los escenarios evaluados los indicadores financieros VAN, TIRM y R(B/C) fueron positivos, el valor de TIRM fue mayor que la Tasa de Interés de Oportunidad (TIO) evaluada del 7,5% (Cuadro 9).

**Cuadro 9.** Indicadores financieros para los 6 escenarios de financiamiento para la producción de madera de *Tectona grandis Linn f.* (teca) en sistemas silvopastoril con diseño de franjas arbóreas.

Parámetro	Escenario					
	I	II	III	IV	V	VI
<b>Capital</b>	Propio	Propio	Crédito	Propio	Propio	Crédito
<b>PSA</b>	No	Si	Si	No	Si	Si
<b>Mercado de ventas</b>	Internacional	Internacional	Internacional	Nacional	Nacional	Nacional
<b>VAN</b>	\$17 612	\$21 536	\$16 412	\$7 070	\$10 994	\$5 856
<b>TIRM</b>	16,5%	18,4%	15,4%	12,5%	14,9%	11,4%
<b>R (B/C)</b>	3,24	3,74	2,27	1,90	2,40	1,45

### Análisis de sensibilidad

En la figura 2 se presentan las curvas de sensibilidad ajustadas para todos los escenarios del

análisis financiero. En todos los casos las tendencias que mejor explica el comportamiento de la TIRM para posibles cambios en las variables costo y beneficio, se encuentran representada por una función cuadrática (ecuación 1).

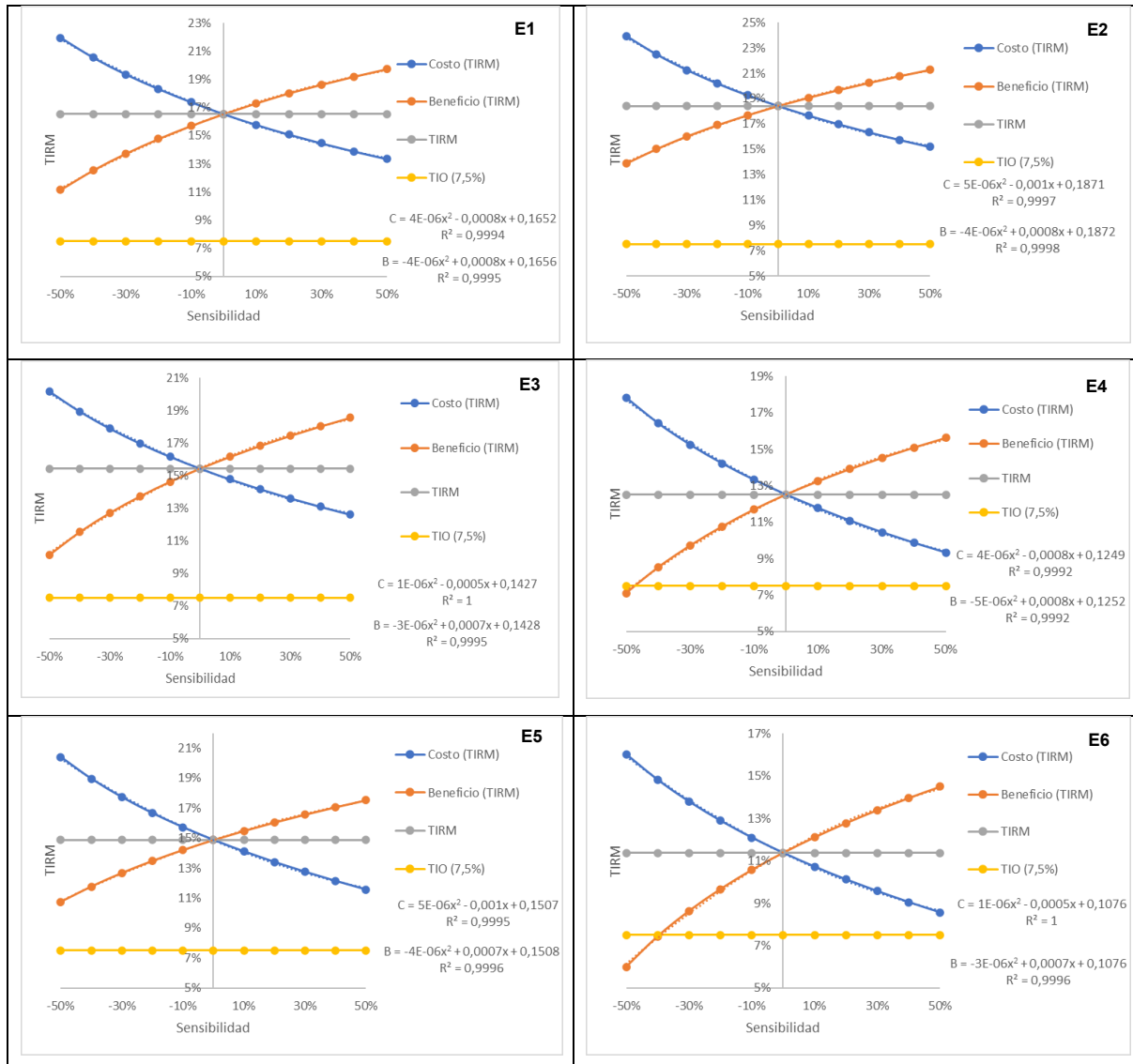
$$y = ax^2 + bx + c. \quad (1)$$

Donde:

$y$  = Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) para la variable sensibilizada.

$x$  = Porcentaje de sensibilidad aplicado sobre la variable sensibilizada.

$a$ ,  $b$  y  $c$  = Coeficientes de la ecuación.



**Figura 5.** Curvas de sensibilidad ajustadas al incremento o disminución en las variables costo o beneficio, para seis escenarios de análisis financiero en la producción de madera de *Tectona grandis* Linn f. (teca) en sistemas silvopastoril con diseño de franjas arbóreas.

Solamente en los escenarios IV y VI (Figura 2-E4 y Figura 2-E6) la función de beneficio

interseca con la recta lineal TIO (Tasa de Interés de Oportunidad) para el rango de estudio. Para estos escenarios se forzó la ecuación de la curva beneficio a tener un valor de TIRM igual al valor de la TIO evaluada, se determinó que las intersecciones con la recta TIO se dan cuando se presenta una disminución del -47,4% y -39,4% respectivamente para cada escenario.

## **Discusión**

En todos los escenarios analizados, la presencia de costos fue constante durante cada año a lo largo del ciclo productivo, mientras que los ingresos por madera se registraron en los años cinco, diez y dieciséis, en función de la ejecución de raleos y cosecha final (Cuadro 1). No obstante, adicional a los ingresos por venta de madera los escenarios con PSA recibieron ingresos adicionales en los años tres y cinco.

El efecto en la demanda del producto y el de la categorización de precios por clase diamétrica, que presenta el mercado de la madera para la venta internacional, favorece económicamente a los escenarios uno, dos y tres, de tal forma que se vuelve una alternativa más apetecible para el productor. Sin embargo, la factibilidad de esto también dependerá de otros factores externos que se vuelven determinantes, como la ubicación geográfica del proyecto, ya que la logística de transporte de contenedores hacia el puerto en el Pacífico, podría influir en la decisión o precio del comprador internacional.

El análisis general del flujo de fondo neto determinó que de forma independiente al escenario de financiamiento, estamos ante la presencia de proyectos no convencionales, a lo largo del ciclo productivo el flujo de fondos podría fluctuar entre valores positivos y negativos; por tanto, se convierte en un inconveniente para el cálculo de indicadores financieros tradicionales como la Tasa Interna de Retorno (TIR). Lo cual determina que sea necesario recurrir a la Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) [20], con el propósito de poder eliminar problemas de inconsistencias producidos por la TIR de uso convencional.

Los valores de TIRM de todos los escenarios evaluados se ubicaron por arriba de 7,5% fijado para la Tasa de Interés de Oportunidad (TIO). Mientras que los valores de VAN se presentaron de forma positiva. La relación de beneficio costo (R(B/C) se mantuvo por arriba de uno en todos los casos (desde 1,45 hasta 3,74). El valor de la TIO usado de referencia (7,5%) se encuentra dentro del intervalo permisible, ya que para plantaciones de teca se ha utilizado tasas que van desde 6% hasta 10% [24].

El conjunto de mejores indicadores financieros se obtuvo con el escenario dos de financiamiento, mientras que el escenario seis fue el menos atractivo para el productor

(Cuadro 8).

En el ámbito de sistemas silvopastoriles la diversidad de alternativas es amplia en cuanto a componentes y diseños, sin embargo, la literatura reportada es pobre sobre temas financieros. No obstante, estudios anteriores como los realizados por Ospino et al. [13], muestran que para alternativas similares con teca pero con una menor densidad de árboles en franja (capacidad 40% menor que la planteada en esta investigación con 75 árb/100m franja), se logra obtener también valores de tasa de interés de retorno (TIR) entre los 12% y 14%, valor actual neto (VAN) desde los \$664 hasta los \$1 400, y relación beneficio costo (R(B/C) de 1,70 hasta 2,41. Si se comparan todos los escenarios evaluados se puede inferir, que las propuestas evaluadas en esta investigación generan mayor rentabilidad y mejores indicadores financieros.

Al comparar los indicadores financieros de los escenarios de este estudio con otros valores reportados para plantaciones de teca, donde el VAN máximo es de \$8 556/ha y la TIR desde 10% hasta 18,8% [24], sustentan los resultados obtenidos en esta investigación y se encuentran por encima de los valores esperados. Es relevante mencionar que algunos de los escenarios de financiamiento investigados dentro de este estudio, tienen la capacidad de superar la rentabilidad de una plantación convencional.

Los escenarios con crédito de inversión vs los escenarios con capital de inversión propio, se observa como menos atractiva la opción de crédito (Cuadro 8). Las opciones I y II con recursos propios, superan ampliamente a todas las demás. No obstante, esto podría ser subjetivo, dado que la forma de inversión se encuentra determinada por las posibilidades del productor o su propia estrategia de inversión. Claramente, la opción de recursos propios con PSA (escenario II) supera a todas las demás en todos los indicadores financieros. En contraste, la opción de crédito con PSA y venta en el mercado nacional (opción VI), fue claramente inferior a todas las demás. La opción de venta internacional de la madera permite alcanzar precios sumamente elevados, lo que explica la diferencia financiera con las opciones de venta a los precios del mercado nacional.

El PSA representa un aporte clave en algunos escenarios. Para escenarios con un mismo mercado de venta de madera se observa que PSA puede figurar como potenciador de ingresos o amortiguador de costos. En venta de madera internacional se observa como en el escenario II (capital propio y PSA) se potencia con la presencia de este, colocándolo como primera opción de financiamiento. No obstante, en el caso del escenario III (crédito y PSA) el PSA cumple su papel en la amortización de gran parte de los costos, dejando menor margen de ingresos y colocándolo como la tercera mejor opción de financiamiento. Escenario I (sin el

PSA y sin crédito), logra constituirse en la segunda mejor opción de financiamiento, superando ligeramente al escenario III (con crédito y con PSA). Esto puede encontrar respuesta en el largo periodo del proyecto, créditos a largo plazo crean costos que sin la presencia del PSA generaría menor retribución de beneficios.

El sistema de crédito con el fondo de financiamiento forestal (FONAFIFO), se basa en una tasa fija del 5% con un periodo de gracia superior a los tres o cuatro primeros años. Con lo cual, genera un costo muy bajo del dinero en forma de crédito, prácticamente inexistente durante los primeros años, que es cuando ocurre más del 60% de la inversión del modelo de costos [14].

En algunos casos la influencia de los altos costos iniciales se relaciona directamente con la resistencia del productor para el desarrollo de proyectos de este tipo. De esta manera, escenarios evaluados con crédito y pago por servicios ambientales (PSA) pretenden ser un mecanismo alternativo que contribuya con la adopción de sistemas silvopastoriles productivos [8].

#### Sensibilidad

Se determinó que las variables costo y beneficio son sensibles a los cambios en cualquiera de los escenarios de financiamiento investigados (Figura 2). La pendiente sobre las curvas son altas, lo que resulta en cambios importantes sobre la rentabilidad del proyecto.

No obstante, a pesar de la alta sensibilidad mostradas se puede inferir que existe holgura de manejo en escenarios que fluctúan en cambios que van desde -50% hasta los 50%, con excepción de los escenarios cuatro y seis (Figura 2-E4 y Figura 2-E6), que presentan una holgura de manejo menor para la sensibilidad de la variable *Beneficio*.

De forma general, a pesar de la alta sensibilidad en las dos variables evaluadas para los escenarios 1, 2, 3 y 5, se puede inferir que sigue siendo rentable la producción de teca en el diseño SSP en estudio. Dado que los resultados de la TIRM se ubicaron sobre la recta de Tasa de interés de Oportunidad (TIO) en todos los casos. La rentabilidad de los escenarios 4 y 6 dependerán únicamente de la sensibilidad en la curva de *Beneficio*, es decir únicamente serán rentables si no se sobrepasa los valores de -47,4% para el escenario cuatro y -39,4% para el escenario seis. Se debe señalar que la variable *beneficio* en los análisis de sensibilidad puede ser afectada por la fluctuación en el precio de venta de la madera, por cambios en la demanda de volumen o imprevistos en el cultivo de madera. Debe recordarse que el volumen presenta un límite superior restringido por la capacidad de producción del SSP, así como un límite inferior controlado por la demanda del mercado. Sin embargo, estos resultados pueden determinarse como confiables para la variable *Beneficio*, bajo un escenario de precios

estables de venta internacional de la madera de teca.

## **Conclusiones**

El cultivo de madera en franjas de SSP es altamente rentable para todos los escenarios evaluados, todos los indicadores financieros son positivos y atractivos para la inversión.

Los escenarios que utilizan un mercado de venta de madera internacional generan mayor rentabilidad que los escenarios con venta de madera en el mercado doméstico.

Para el mismo mercado de venta de madera, escenarios con financiamiento mediante crédito con el FONAFIFO, obtuvieron indicadores financieros menos atractivos que los escenarios con capital de inversión propia.

Para el mismo mercado de venta de madera, la presenta de PSA aumentará la rentabilidad del escenario con financiamiento propio y amortizará gran parte de los costos del escenario con crédito.

El análisis de sensibilidad de las variables *Costo* y *Beneficio* de todos los escenarios se ajusta a una función de tipo cuadrática

Las variables *Costo* y *Beneficio* son sensibles a cambios mayores a niveles de 50% y 40% respectivamente.

Los escenarios IV y VI dejan de ser rentables si los cambios en la variable beneficio supera los valores de -47,4% para el escenario cuatro y -39,4% para el escenario seis.

La mejor alternativa de financiamiento se obtuvo con el escenario de financiamiento propio, con venta de la madera en el mercado internacional e ingresos por PSA; con un VAN de \$21 536, una R(B/C) de 3,74 y una TIRM de 18,4%.

La peor opción de financiamiento se obtuvo con el escenario de financiamiento mediante crédito, con venta de madera a nivel nacional y con ingreso adicional por el PSA; que generan un VAN de \$5 856, una R(B/C) de 1,45% y una TIRM de 11,4%.

La segunda mejor opción de financiamiento se obtiene con recursos propios y sin PSA, que generan un VAN de \$17 612, una R(B/C) de 3,24 y una TIRM de 16,5%.

## Referencias

- [1] M. Chacón, C. Reyes, and J. Segura, "Estrategia para la Ganadería Baja en Carbono en Costa Rica," 2015.
- [2] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), *VI Censo Nacional Agropecuario: Atlas Estadístico Agropecuario*. San José, Costa Rica, 2015.
- [3] S. Mora, "Indicadores Macroeconómicos 2017-2021," 2021.
- [4] E. Mora Monge *et al.*, "Informe de gestión del Sector Agropecuario, Pesquero y Rural (Mayo 2020-Abril 2021)," 2021.
- [5] Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), *NAMA Ganadería - Ganadería bovina en Costa Rica*. .
- [6] K. Blanco, A. Chacón, G. Jiménez, J. Montenegro, and J. Sasa, *Inventario nacional de emisiones por fuentes de abosorcion por sumideros de gases de efecto invernadero en Costa Rica 2015*. San José, Costa Rica, 2015.
- [7] D. Pezo and I. Muhammad, *Módulo de Enseñanza Agroforestal No.2 - Sistemas silvopastoriles*, 2nd ed. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 1999.
- [8] C. Villanueva, I. Muhammad, and G. Haensel, *Produccion y rentabilidad de sistemas silvopastoriles - Estudios de caso en América Central*. Turrialba, San José: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2010.
- [9] O. Murillo, M. Leitón, M. Ospino, Y. Badilla, W. Paniagua, and A. Valverde, "Hacia un nuevo sistema silvopastoril," *Rev. Germinar*, vol. 17, no. 5, pp. 16–17, 2015.
- [10] M. Yvette, M. Ibrahim, M. Cómez, and K. Prins, "Potencial y limitaciones para la adopción de sistemas silvopastoriles para la producción de leche en Cayo, Belice," *Agroforestería en las Américas*, vol. 8, no. 30, pp. 24–27, 2001.
- [11] J. Gobbi and F. Casasola, "Comportamiento financiero de la inversión en sistemas silvopastoriles en fincas ganaderas de Esparza, Costa Rica," *Agroforestería en las Américas*, vol. 10, no. 39–40, pp. 52–60, 2003.
- [12] M. Ospino, Y. Badilla, W. Paniagua, C. Campos, and O. Murillo, "Costos de producción de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en sistemas silvopastoriles de la zona norte de Costa Rica," *Agron. Costarric.*, vol. 44, no. 2, pp. 155–173, 2020, doi: 10.15517/rac.v44i2.43109.
- [13] M. Ospino, O. Murillo, and M. Alfaro, "Análisis financiero y de escenarios de financiamiento del componente forestal en sistemas silvopastoriles," *Rev. For. Mesoam. Kurú*, vol. 19, no. 45, pp. 28–37, 2022, doi: 10.18845/RFMK.V19I45.6323.



- [14] J. Jiménez-Jiménez, O. Murillo, and Y. Badilla, "Modelo de costos por árbol para el cultivo de madera de teca (*Tectona grandis* Linn f.) en sistemas silvopastoriles."
- [15] O. Murillo, "Programa para la estimación del volumen comercial y valor de la plantación forestal." Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ing. Forestal, Cartago, Costa Rica, 2022.
- [16] J. L. Fallas, "Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de Teca (*Tectona grandis* L.f) en Costa Rica," Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2018.
- [17] Banco Central de Costa Rica, "Tipo cambio de compra y de venta del dólar de los Estados Unidos de América," *Banco Central de Costa Rica*, 2021. <https://gee.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?CodCuadro=400&Idioma=1&FecInicial=2021/01/01&FecFinal=2021/10/11&Filtro=0&Jump=2> (accessed Sep. 10, 2021).
- [18] W. Ladrach, *Manejo práctico de plantaciones forestales en el trópico y subtrópico*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2010.
- [19] D. Taco and M. Gutiérrez, "Valoración de inversiones en proyectos no convencionales - Tasa interna de retorno versus Tasa interna de retorno modificada.," *INNOVA Res. J.*, vol. 3, no. 9, pp. 116–124, 2018, doi: 10.33890/innova.v3.n9.2018.797.
- [20] G. S. Milanesi, F. Rotstein, J. I. Esandi, and R. D. Perotti, "La TIR modificada como herramienta complementaria en la evaluación financiera," 2004.
- [21] FONAFIFO, "Crédito Forestal," 2018. <http://www.fonafifo.go.cr/es/servicios/credito-forestal/> (accessed Jul. 13, 2021).
- [22] FONAFIFO, "Sub-Programa: Sistemas Productivos Forestales -SIPROF-." 2022.
- [23] L. Gaceta, *Resolución R-060-2022-MINAE*. San José, Costa Rica, 2022, pp. 26–31.
- [24] L. Saje, J. Kent, and J. Moreles, "Rentabilidad de las inversiones de teca," in *Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades*, R. Camino and J. Pierre Morales, Eds. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2013, pp. 202–223.

**Objetivo Específico 2:** CORFOGA, Consolidar un programa nacional de fomento y asistencia técnica a ganaderos para su conversión en SSP

**Puede decirse que este objetivo tuvo un carácter más de tipo de vinculación/extensión y no de investigación clásico.** Aquí le correspondió a CORFOGA un papel protagónico, como Institución rectora del sector ganadero nacional y responsable por el fomento de este tipo de iniciativas. Durante el desarrollo del proyecto, se tuvo una estrecha participación entre el TEC y CORFOGA, con un fuerte apoyo en campo de sus técnicos regionalizados, con quienes se realizaron conjuntamente, charlas de motivación y búsqueda de finqueros líderes para establecer los nuevos diseños SSP. De manera concreta, CORFOGA utilizó su red de técnicos y fincas líder para lograr conseguir finqueros modelo. Como estrategia se trató de lograr establecer al menos uno o dos SSP en una región geográfica al año. Estas fincas servirán de base para fomento a través de días de campo y para generar datos de crecimiento, producción, etc.

**Cuadro 1:** Fincas donde se establecieron SSP con el apoyo de CORFOGA y el TEC, periodo 2020 y 2021.

Región geográfica	Productor	Cantidad de franjas y árboles
San Vito, Buenos Aires,	1. Carlos Hernández 2. Gilberto Rojas	1. 6 franjas, (Gmelina, Acacia mangium) aprox 3000 árboles 2. 12 franjas (Gmelina, Teca, pilón, Acacia mangium, Laurel), aprox 5000 árboles
Pérez Zeledón,	3. Geovany Villegas	3. 8 franjas, (Gmelina) 3000 árboles
Filadelfia, Sardinal Liberia, Quebradilla	4. Marita ... 5. Pedro Suárez	4. 6 franjas, (Gmelina) aprox 1500 árboles 5. 8 franjas (Gmelina, Teca, Cedro, Acacia mangium, Cenízaro, Guanacaste), aprox 3000 árboles
San Carlos, Florencia, Finca La Vega TEC	6. TEC	6. 2 franjas (Acacia mangium) 750

Adicional a estas fincas, con apoyo de FUNBAM (Fundación Banco Ambiental) se establecieron 30 SSP en fincas de pequeños productores de los cantones de San Carlos, Guatuso y Los Chiles durante los años 2021 y 2022 (Ver cuadro 2). Se capacitó al personal técnico de FUNBAM, se produjeron las plantas (clones de Gmelina principalmente) y se asesoró a varios de los productores en como establecer los SSP.

**Cuadro 2:** Finqueros de la zona norte donde se establecieron sistemas silvopastoriles con la gestión de FUNBAM, los diseños SSP y clones de melina y teca del TEC (2021-2022)

Propietario	Oficio	Cantón	Distrito	Árboles	Especie
Marcos Antonio Gutiérrez Zambrano	Agricultor	Los Chiles	El Amparo	1500	Melina
Agrícola Veredas de Pocosal		San Carlos	Pocosol	1100	Melina, nativas
Carlos Luis Bolaños Alvarado	Agricultor	San Carlos	Pocosol	3000	Melina Nativas
3-101-701646 S.A.	Agricultora	San Carlos	Pocosol	2650	Melina
Esteban Mora Sandoval	Agricultor	San Carlos	Pocosol	1500	Nativas
Nidia Mejías Murillo	Agricultora	San Carlos	Pocosol	750	Melina
Gerardo Abel Blanco Rojas	Agricultor	San Carlos	Pocosol	3000	Melina teca
Leila Segura Koschnny	Conserje - Agricultor	San Carlos	Cutris	1500	Cebo, botarrama
Lilliana Esquivel González	Transportista	Los Chiles	San Jorge	1047	Laurel
Sara Lizano Zumbado	Agricultora	San Carlos	Pocosol	761	Melina, nativas
Carlos Eduardo Cruz Rojas	Agricultor	Los Chiles	San Jorge	1200	Teca, nativas
Esli Antonio Vega Alvarado	Agricultor	Guatuso	Buena Vista	825	Nativas
Oscar Mario Cruz Rojas	Agricultor	Los Chiles	San Jorge	2400	Teca melina
Agro JM Faes Sociedad Anónima	Agricultura	Los Chiles	San Jorge	2000	Teca, pilón
Adrián Hidalgo Víquez	Agricultor y Ganadero	Los Chiles	San Jorge	2000	Melina
Jorge Arturo Gonzalez Cuadra	Productor Agropecuario	Los Chiles	San Jorge	750	Teca, melina
Juan José Garita Vargas	Productor Agropecuario	Los Chiles	San Jorge	1500	Melina, cedro
Minor Delgado Delgado	Agricultor	Los Chiles	Amparo	1500	Teca, nativas
Biobotánica JALA S.A	Ing. Agronomo	San Carlos	Pocosol	1000	Melina, nativas
Bernardita Blanco	Ama de casa	Guatuso	San Rafael	750	Melina, teca
Felix Bolaños Porras	Agricultor	Guatuso	Buena Vista	1000	Melina, poró
Isabel Arrieta Arrieta	Agricultor	Guatuso	Buena Vista	2000	Melina, nativas
Jorge Eduardo Rodríguez Rodríguez	Jubilado	San Carlos	Pocosol	1500	Teca, nativas
Inversiones y reforestaciones VARI de Coopevega SA		San Carlos	Cutris	3250	Cebo
Luis Miguel Vargas Arias	Docente	San Carlos	Cutris	3400	Cebo
KUPLING GLOBAL S.A.	Agricultor	San Carlos	Cutris	3780	Nativas
Mario Enrique Araya Sandoval	Agricultor	San Carlos	Pocosol	880	Melina, nativas
Geyner Elizondo Álvarez	Agricultor	Guatuso	San Rafael	965	Melina
Leila Segura Koschnny	Conserje - Agricultor	San Carlos	Cutris	2000	Cebo
<b>Instituto Tecnológico de CR</b>	<b>Investigación/Docencia</b>	San Carlos	<b>Florencia</b>	750	Acacia, almendro



**Figura 1:** Melina en sistema silvopastoril en franjas, pequeños productores beneficiarios de FUNBAM en San Jorge Los Chiles, 2021.



**Figura 2:** Ensayo de espaciamientos de teca en sistema silvopastoril en franjas, finca La Vega (propiedad del TEC) en Florencia, San Carlos.

Como parte del trabajo técnico del TEC, se elaboró un Manual Técnico para las actividades de fomento, días de campo, extensión en general. Este Manual tuvo tres ediciones, se incluye aquí la última versión por contener y mejorar la información de las anteriores.

1. Murillo, O., Badilla, Y., Jiménez, J., Jiménez, O. 2020. Sistema silvopastoril en franjas. Instituto Tecnológico de Costa Rica (Escuela de Ing. Forestal)/CORFOGA/FONAFIFO. Cartago, Costa Rica. 15 p.

2. Murillo, O., Badilla, Y., Jiménez, J. 2021. Sistema silvopastoril en franjas. Instituto Tecnológico de Costa Rica (Escuela de Ing. Forestal)/CORFOGA/FONAFIFO. Cartago, Costa Rica. 16 p.

3. Murillo, O., Badilla, Y., Jiménez, J., Jiménez, O. 2023. Árboles en franjas para fincas ganaderas. Instituto Tecnológico de Costa Rica (Escuela de Ing. Forestal)/CORFOGA/FONAFIFO. Cartago, Costa Rica. 16 p.

Adicional a los trabajos de campo, se preparó material divulgativo en PPT para su presentación en conferencias organizadas por la EIFO (Unidad de Vinculación) y una Webinar de carácter internacional, que ayudaron a divulgar significativamente los avances del proyecto a nivel internacional:

a) Murillo, O. 2021. Cultivo de maderables en Sistemas Silvopastoriles. Conferencia internacional WEBINAR, Mayo, 2021. Instituto Tecnológico de CR, Escuela de Ing. Forestal. Cartago, Costa Rica.

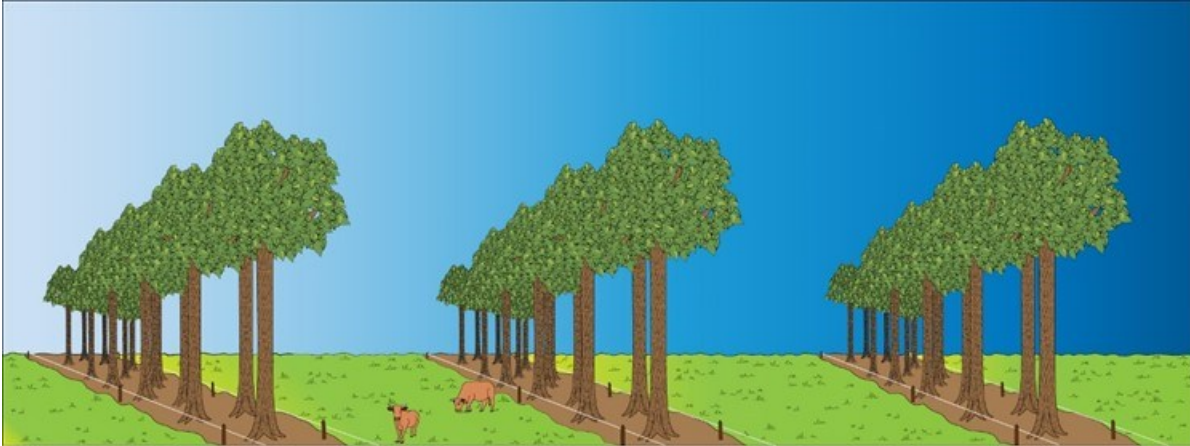
En un congreso internacional sobre Agroforestería, se participó con el siguiente trabajo, que incluyó los SSP:

b) Murillo, O. 2021. WEBINAR, Noviembre, 2021. Sistemas agroforestales en Costa Rica con un enfoque productivo. En: Congreso Internacional Agroforestería Dinámica 2021. Universidad Mayor San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Se adjunta el PPT desarrollado para tales actividades

Debe también mencionarse, que La situación del COVID impidió la organización de días de campo, con lo cual se habría logrado una mayor transferencia de conocimiento a los finqueros y una mayor adopción del proyecto.

## Árboles en franja para fincas ganaderas



### Presentación

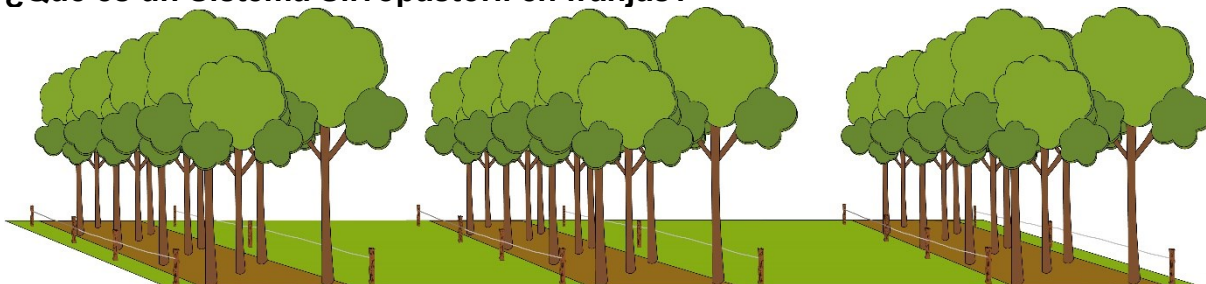
Los sistemas silvopastoriles son una modalidad de producción ganadera, que se asocia con el cultivo de especies forestales de producción de madera. Esta asociación ganadera y forestal, permite diversas modalidades de producción de carne, leche, forraje, así como de producción de madera en ciclo corto o largo (Murillo *et al.* 2015). Adicional a la contribución económica de la madera en la finca ganadera, los árboles van a generar servicios ambientales como, proveer sombra, fijación de carbono, rompeviento, belleza escénica y una mayor biodiversidad en general, que contribuyen a mitigar los efectos del cambio climático (Paniagua *et al.* 2018). La asociación de ganadería con maderables, tiene como propósito adicional el fomento de sistemas productivos carbono neutral, en concordancia con las políticas del NAMA ganadería y la apertura de nuevos mercados de exportación de carne nacional.

El sistema silvopastoril en franjas combina árboles maderables con pasturas y ganado, los árboles se establecen dentro de franjas de 6m de ancho en algunos linderos y divisorias de las áreas de pastoreo, lo que permite asociar la producción ganadera con la de madera de alto valor comercial. De esta manera, se podrá aumentar el valor económico, obtener sombra durante el periodo seco, embellecimiento, aumento de la biodiversidad y visita de aves y fauna en las fincas, proporcionando de esta forma un mayor beneficio al productor.

Este documento pretende orientar y motivar a los productores a establecer Sistemas Silvopastoriles en franjas mediante conocimientos básicos sobre técnicas, establecimiento y manejo de estos sistemas.

## Sistema Silvopastoril en Franjas

### ¿Qué es un Sistema Silvopastoril en franjas?



Es una opción de producción donde se combinan árboles maderables con pasturas y ganado para la obtención de diversos beneficios. En este sistema los árboles se establecen dentro de franjas de 6m de ancho en algunos linderos y divisorias de las áreas de pastoreo, lo que permite asociar la producción ganadera con el cultivo de madera de alto valor comercial. De esta manera, el ganadero podrá aumentar el valor económico de su finca, obtener sombra durante el periodo seco, su embellecimiento, un aumento de la biodiversidad y visita de aves y fauna, entre otros beneficios.

### ¿Qué especies se pueden plantar?

Para elegir apropiadamente la(s) especie(s) maderable(s) se debe tomar en cuenta la altitud, el clima de la región y el tipo de suelo de la finca, así como si se desea producir la madera en ciclo corto (3 a 5 años), ciclo mediano (8 a 10 años) o a largo plazo (10 a 16 años). También es posible combinar especies y ciclos de producción en una misma finca. Donde puede tenerse sectores con ciclo corto (melina) y otros con ciclo largo (teca, pilón, almendro, cedro).

Entre las especies recomendables para la producción de madera se puede elegir entre las exóticas: teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*), Acacia (*Acacia mangium*) y pino (*P. tecunumanii*, o *P. oocarpa*). Entre las nativas está el laurel (*Cordia alliodora*), cedro (*Cedrela odorata*), pilón (*Hieronyma alchorneoides*) y almendro (*Dipteryx panamensis*). De todas estas especies se cuenta con semilla segura de muy alta calidad genética y buen crecimiento en campo, que aseguran una alta rentabilidad en la producción de madera.

### Preparación del terreno para plantar los árboles

#### a. Establecimiento de cercas

La cerca es necesaria ya que el ingreso de los animales causa compactación en el suelo, daños en el fuste y en la copa de los árboles (primeros años). Además, bajo la sombra habrá poco alimento para ellos. La utilización de la cerca eléctrica, cuando sea posible, es recomendable debido a su menor costo y facilidad de manejo.

b. Eliminación de pastos y otras malezas dentro de la franja.

Esta actividad se realiza con el objetivo de facilitar y asegurar el establecimiento, supervivencia y desarrollo óptimo de los árboles, mediante la eliminación de la fuerte competencia que ejerce el pasto. Se estima en pérdidas de hasta un 30% en el crecimiento de los árboles. En especies como el laurel, puede ser aún mayor. La maleza puede ser también hospedera de muchas plagas. El control de malezas puede ser realizado de manera manual (guadaña), mecanizada (chapeadora), mediante el uso de coberturas o mediante control químico, según los recursos que se dispongan. El control químico suele ser el más efectivo, pero no se debe aplicar antes de que los árboles alcancen al menos 75 cm de altura. Si se logra preparar el terreno, se puede iniciar con un pre-emergente (Oxifluorfen) para lograr mantener limpia la franja por casi 3 meses. De lo contrario, unas dos semanas previo a la siembra de los árboles, se debe proceder a quemar el pasto con herbicida. Algunos finqueros han plantado especies ornamentales que toleran la sombra, con lo cual, se justifica y abarata el control del pasto.

c. Preparación del suelo

De acuerdo con las condiciones del terreno (topografía, acceso) se decide la posibilidad de realizar prácticas de subsolado y rastrea. El propósito es reducir la compactación producto del pastoreo y mejorar el drenaje interno del suelo, de modo que permitan un mejor desarrollo inicial de las raíces de los árboles. En caso de no poder preparar el suelo, se deberá incrementar la profundidad y amplitud del hueco o también, utilizar un hoyador portátil.

d. Corrección de acidez

Es común que los suelos en zonas lluviosas presenten problemas de acidez, cuyo resultado es que impide que las plantas puedan absorber los nutrimentos del suelo. Por lo general, se considera como suelo ácido cuando el valor de pH sea inferior o igual a 5,5 o también, cuando la saturación de acidez es mayor al 25%. Esta información se obtiene de un análisis de suelo denominado, químico completo. Como medida correctiva se recomienda aplicar cal al fondo y alrededor del hueco (150 a 200 g por árbol), se mezcla luego con un poco de tierra para evitar que tenga contacto con las raíces del árbol (ver Figura 1). Es decir, si se aplican 200g por árbol, se requerirá 400 k (8 sacos de 50k c/u). De ser posible, es preferible la cal dolomita. Una segunda encalada podría aplicarse al año siguiente, poco antes del inicio del periodo lluvioso.





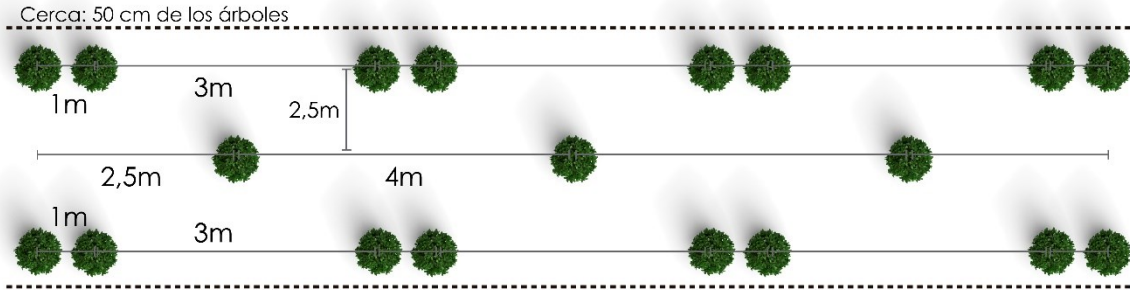
Figura 1: Encalado a la siembra. 100 g al fondo del hueco y 100 g en la periferia externa.

e. Eliminación de hormigueros

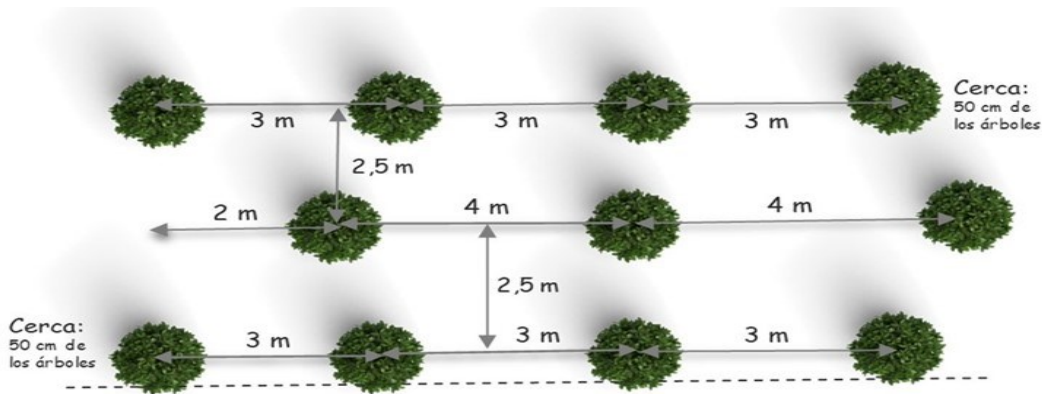
Especialmente crítico en la siembra de la melina. Se deberá localizar los nidos próximos al sitio a plantar y tratar de eliminarlos. Para esto existen varias opciones, desde insecticida granulado que se deja sobre el camino de la hormiga, hasta el uso de repelentes como el Regent. La vigilancia del ataque de la hormiga deberá hacerse cada 3-4 semanas.

### **Distribución de los árboles dentro de la franja**

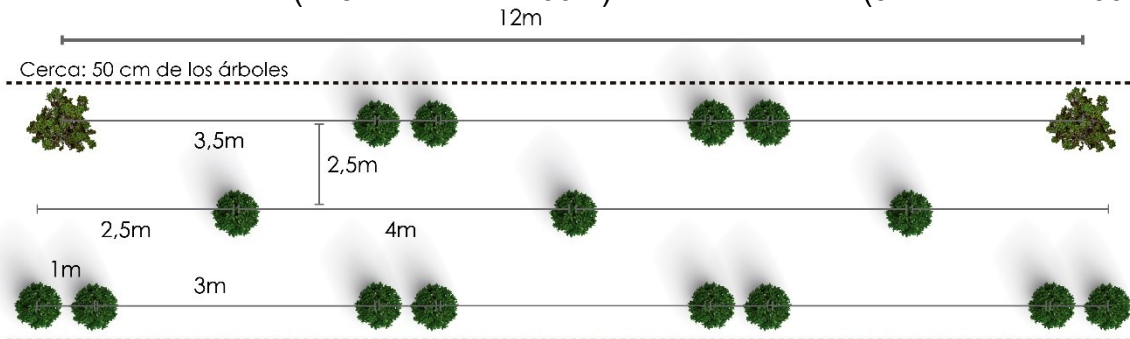
En las siguientes figuras se muestra opciones de siembra de los árboles en la franja. Modelo 1 (alta productividad, 125 árboles en cada 100 m de cerca). Con esta opción se logra la mayor producción de madera, pero requiere de una intervención (raleo) más temprana para mantener el buen crecimiento de los mejores árboles que continúan en pie por más años.



**Modelo 2 (Productividad media, 91 árboles en cada 100 m de cerca).**  
 A pesar de plantarse menos árboles, esta opción logra una buena producción de madera y permite que el primer raleo ocurra uno o dos años más tarde.



**Modelo 3 (Producción e incorporación de árboles nativos de valor biológico)**  
 Con el propósito de generar sombra durante el periodo seco, se podrá plantar cada 12m un árbol de hoja perenne (acacia o pilón en zonas húmedas, acacia o cenízaro en zonas secas). Estos árboles se plantan en la línea de borde que colinda con el repasto. Bajo este mismo principio, se podrá también plantar árboles con fines no productivos, para aumento de la biodiversidad o brindar belleza escénica. Puede basarse en el modelo 1 (125 árboles en 100m) o en el modelo 2 (91 árboles en 100m)



**Modelo 4 (una sola hilera)**

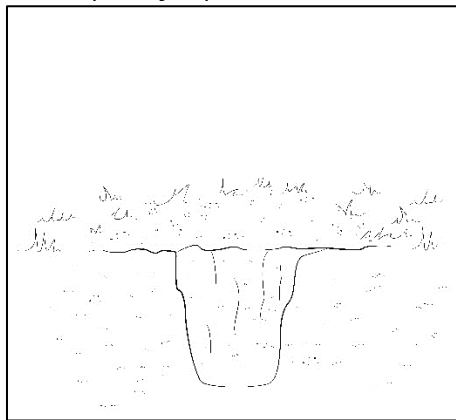
Esta opción se utiliza con fines productivos, para crear sombra o aumentar biodiversidad. Se puede establecer en los linderos de la finca, o en líneas divisorias

entre apartos. Sin embargo, el árbol deberá estar protegido de los animales por medio de una cerca.

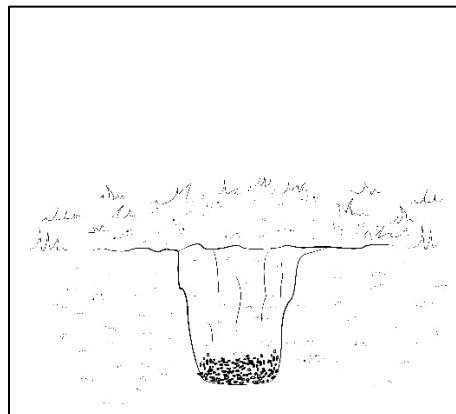


### ¿Cómo se debe plantar los árboles?

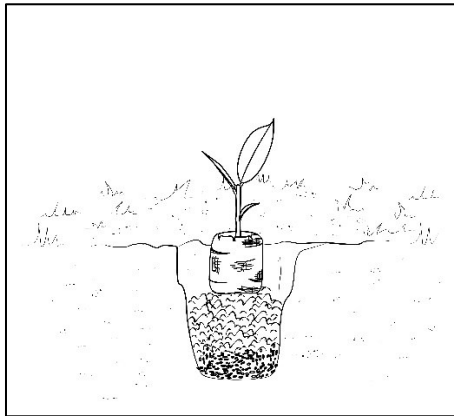
- Realice un hueco de aproximadamente 30 cm de profundidad o dos veces la altura del arbolito. Limpie en tierra con una pala ancha, una superficie alrededor del árbol de 1m de diámetro (rodajea).



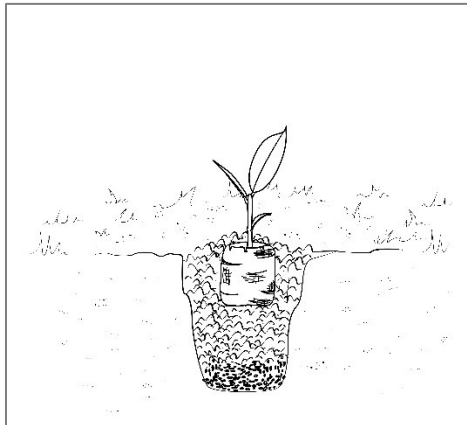
- En suelos ácidos, se puede agregar 100g de cal dentro del hueco y otros 100 g en la periferia inmediata. La cal se deberá mezclar con tierra para evitar que toque las raíces de la planta. En suelos básicos ( $\text{pH} > 5,5$  o con muy baja saturación por aluminio,  $< 25\%$ ), se podrá colocar 50 g de fertilizante al fondo del hoyo.



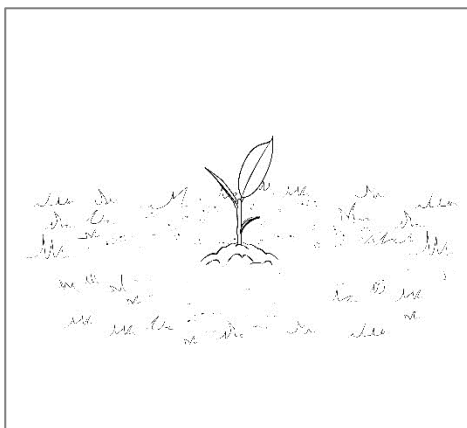
- Posicione en forma recta el árbol en el centro del hueco.



- d. Llene con tierra el hueco, presione alrededor del árbol hasta dejarlo firme y evitar dejar espacios vacíos. El árbol debe quedar levantado sobre la superficie, de modo que el agua no se encharque alrededor y escurra de forma libre.



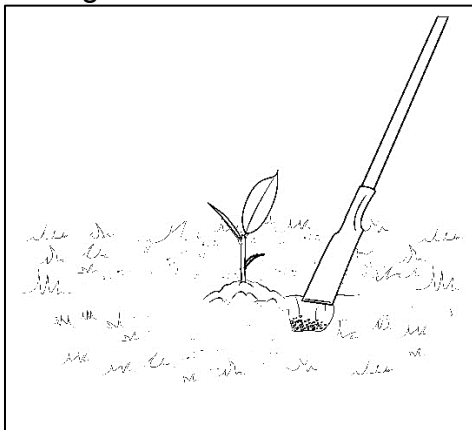
- e. Recuerde que un árbol bien plantado es aquel que:
- Se encuentra en una posición recta, sin inclinación.
  - Tiene tres pares de hojas, sin quebradura de tallo ni de la yema principal.
  - Tiene una rodajea limpia en tierra, de 1m de diámetro alrededor.
  - Se observa ligeramente sobre el nivel de la línea del terreno, de modo que asegura que el agua escurra alrededor.
  - Sano y sin hojas con deficiencia nutricional visible (clorosis, otras).
  - Se observa una abundante presencia de raíces alrededor del árbol.



Arbolito correctamente plantado

### **Fertilización del suelo después de plantados los árboles**

Con base en el análisis del suelo se logra definir la necesidad de fertilizar. En un suelo de baja fertilidad no podremos producir madera en forma comercial, a menos que se le ayude con fertilizantes. Por lo general, se recomienda fertilizar al momento de la siembra o un mes posterior al encalado. Se inicia con 50 g de fertilizante alto en fósforo (10-30-10 /12-24-12), aplicado mediante el método de espeque, con uno o dos hoyos a 10 cm de distancia del árbol. Se puede reforzar a los 3 meses con 100 gramos por árbol de fertilizante alto en nitrógeno.



Método de incorporación de fertilizante con el espeque

### **Mantenimiento del árbol plantado**

Las labores de mantenimiento son necesarias para asegurar el óptimo desarrollo y el valor comercial a futuro de la madera de los árboles. Por lo general, la intensidad del mantenimiento es alta los primeros dos años.

El control de malezas es la actividad de mayor relevancia y costo. El pasto reprime el crecimiento de los árboles y debe ser eliminado dentro de la franja. Desde el momento de la siembra, se recomienda rodajear dejando limpio 1m alrededor del árbol. A los

dos o tres meses debe iniciarse con un programa de control de malezas. Hay varias opciones al respecto: control químico (herbicida), mecánico (guadaña), uso de coberturas (manicillo u otros) o hasta plantar un cultivo de corta duración como frijol, maíz, yuca, ornamentales.

Durante el período lluvioso es necesario realizar intervenciones cada dos meses o cuando la maleza supere unos 50 cm de altura. El uso del herbicida al inicio deberá ser aplicado muy cuidadosamente mientras el árbol tenga una altura menor a 1m. El control del bejuco y enredaderas es vital, en pocos días pueden causar estrangulación, quebradura y hasta pérdida del árbol.

El control de plagas como la hormiga en melina, los chupadores en guanacaste y cenízaro, y el barrenador del cedro, deben formar parte del manejo inicial de los árboles. Con estas especies es necesario incorporar atomizaciones frecuentes de insecticidas cada 30-45 días. En el caso del cedro, deberá atomizarse cada 3 semanas a partir de los 3 meses de plantado.

En teca es común que después de una lluvia fuerte con viento algunos árboles se inclinen. Se acostumbra a amarrar los árboles con dos o tres vientos (con piola) en las próximas 48 horas, de lo contrario no se podrá recuperar su verticalidad.

## Resiembr

Es normal que ocurra mortalidad de arbolitos, causado por factores bióticos como ataque de hormiga, de grillo, de venado, bejucos, maleza. O por factores abióticos como por efecto del viento, encharcamiento o inundación, sequía, mal uso del herbicida. Si la mortalidad ocurre distribuida por toda la franja y es inferior al 8-10%, no es necesario replantar. Pero si se concentra en sectores, dejando espacios amplios sin árboles, se recomienda resembrar en los primeros 45 días.

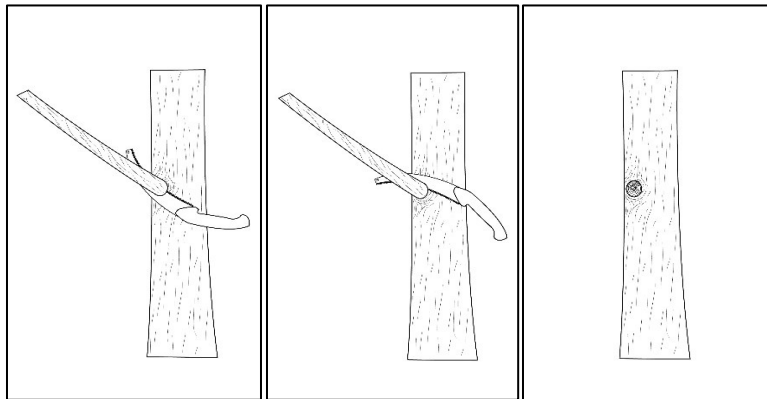
La siguiente información sirve de referencia para la ejecución de labores de mantenimiento durante los primeros 24 meses.

Espece	Malezas (cada 2-3 meses)	Control de Hormiga, barrenador (cada 30-45 días)	Poda de Formación (mes 3 y 6)	Despunta de rama (mes 3 y 6)	Deshija (mes 6 al 9)	Poda de rama baja hasta 2,5m (mes 6 al 18)	Poda media hasta 5 m (mes 18 al 36)
Teca	X	X			X	X	X
Melina	X	X	X	X	X	X	X
Acacia	X					X	X
Pino	X					X	X
Almendro	X	X	X			X	X
Laurel	X	X	X			X	X
Pilón	X					X	X
Cedro	X	X	X			X	X

## Poda de ramas

La poda se realiza con el objetivo de producir madera libre de nudos a futuro. El corte

de la rama debe ser lo más limpio posible sin dejar ningún segmento. Con ramas gruesas, se debe primero realizar un primer corte por debajo de la rama y terminar con el corte por encima de la rama, para evitar una ruptura de la rama por su peso.



### Despunte

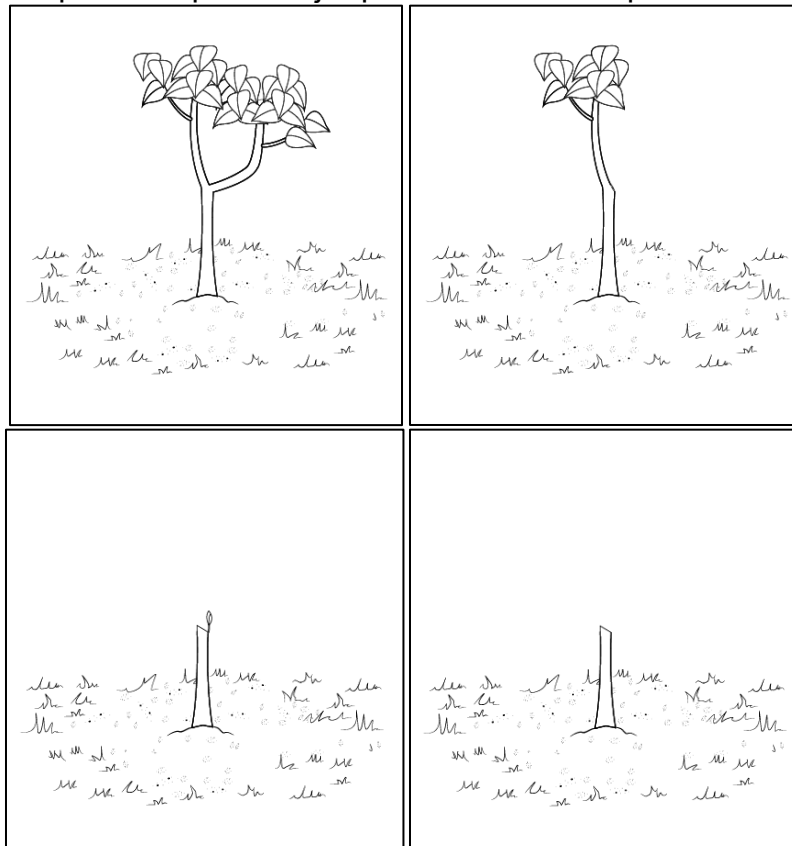
En especies de muy rápido crecimiento como la melina, se practica la técnica del despunte o corta de la yema terminal de las ramas laterales. El propósito es fortalecer el crecimiento de la yema principal y se realiza aproximadamente en los meses 3 y 6.



### Poda de formación

En algunos casos, los daños por insectos, viento, o por descuido con las herramientas durante las chapeas, pueden provocar la quebradura o pérdida de la yema principal. Esto produce la aparición de varios brotes, momento en que es importante elegir temprano el de mejor posición o liderazgo. Con esto se logra recuperar el crecimiento vertical del árbol y obtener a futuro madera comercial. Es común la aparición de la bifurcación temprana, que requiere la elección de la rama mejor posicionada. En casos extremos, se forma una bifurcación que no es posible corregir, por lo que se debe cortar completamente el tallo por debajo de la bifurcación (ver dibujos en la parte baja).

Con esta acción se espera que alguno de los nuevos brotes emerja con una mejor posición, para poder elegirlo y recuperar así la forma recta del tronco. La regla de oro es, entre más temprano se puede mejor posibilidad de recuperación.

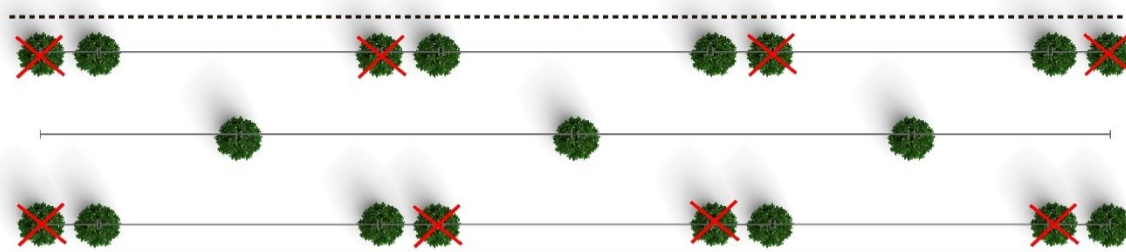


### ¿Cuándo raleo?

El raleo se realiza con el objetivo de liberar espacio de crecimiento a los mejores árboles. Este sistema productivo permite que se realice una extracción de un 50% de los árboles a los 3 años (en melina), 5 o 6 años (las demás especies). Proporciona además, un primer ingreso económico al productor con la venta de la madera.

Los diseños propuestos permiten que se realice un raleo del 50% de los árboles de menor crecimiento, baja calidad o enfermos, preferiblemente en las dos hileras de borde. Usando de guía las siguientes figuras:

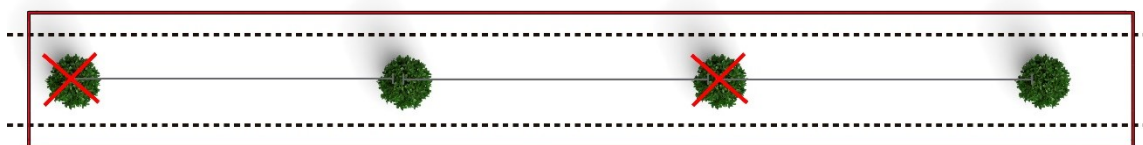
### Modelos 1 y 2





Los modelos 1 y 2 permiten realizar dos raleos. El primero elimina el árbol de menor potencial de cada pareja en las hileras de borde. El segundo raleo 4 a 5 años después, elimina un 50% de los árboles remanentes en las dos hileras de borde.

### Modelo 3



En el cuadro siguiente se muestra una guía para la ejecución de los raleos y la producción esperada por cada 2000 árboles, sumando raleos y cosecha (Murillo y Badilla 2015, Quirós 2015, Fallas, 2017, Vallejos 2018, Calvé *et al* 2020).

Especie	Raleo I (40-50%) Año	Raleo II (50%) Año	Cosecha	Producción esperada con 2000 árboles (pulgadas)
Teca	4-5	9-10	Año 16-18	110 000 (300m <sup>3</sup> )
Melina	3	No aplica	Año 5-6	240 000 (660m <sup>3</sup> )
Acacia	4-5	7	Año 8-10	150 000 (400m <sup>3</sup> )
Pino	4-5	9-10	Año 15-16	150 000 (400m <sup>3</sup> )
Laurel ( <i>Cordia a.</i> )	4-5	8-9	Año 15-16	150 000 (400m <sup>3</sup> )
Cedro ( <i>Cedrela o.</i> )	4-5	8-9	Año 15-16	150 000 (400m <sup>3</sup> )
Pilón ( <i>Hieronyma a.</i> )	5-6	9-10	Año 16-18	90 000 (240m <sup>3</sup> )
Almendro ( <i>Dipteryx p.</i> )	5-6	9-10	Año 16-18	90 000 (240m <sup>3</sup> )

Las siguientes figuras muestran el costo total por árbol y su distribución según actividad y rubro, como parte del cultivo de las especies melina y teca. El costo por árbol se refiere a todo el ciclo del cultivo o rotación de ambas especies, dentro de sistemas silvopastoriles.

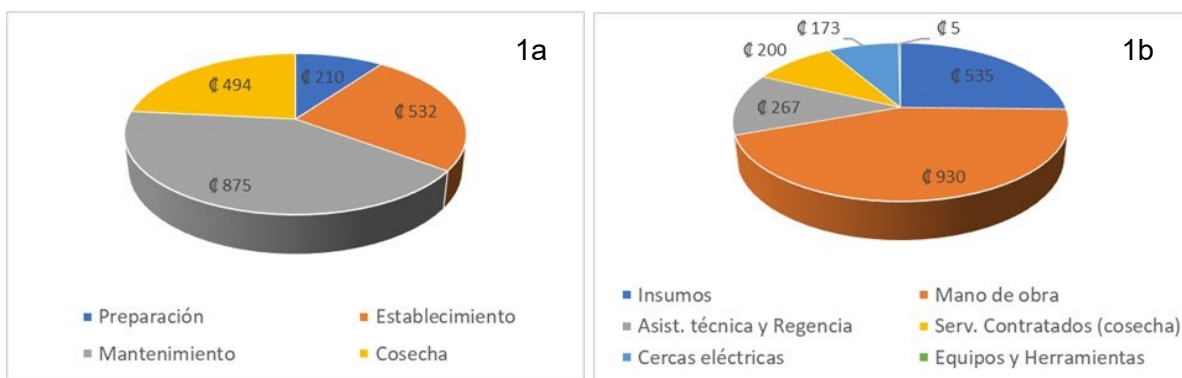


Figura 1: Costo total en colones por árbol individual (¢ 2110, donde 1US\$ = ¢635) distribuido por actividad (1a) y por rubro (1b), para el ciclo completo (5-6 años) de cultivo de **melina** en franjas (6m de ancho x 1600m de largo, N = 2000) en sistemas silvopastoriles en Costa Rica.

El detalle de costos por árbol de teca en el sistema silvopastoril, se muestra en las siguientes figuras 2.

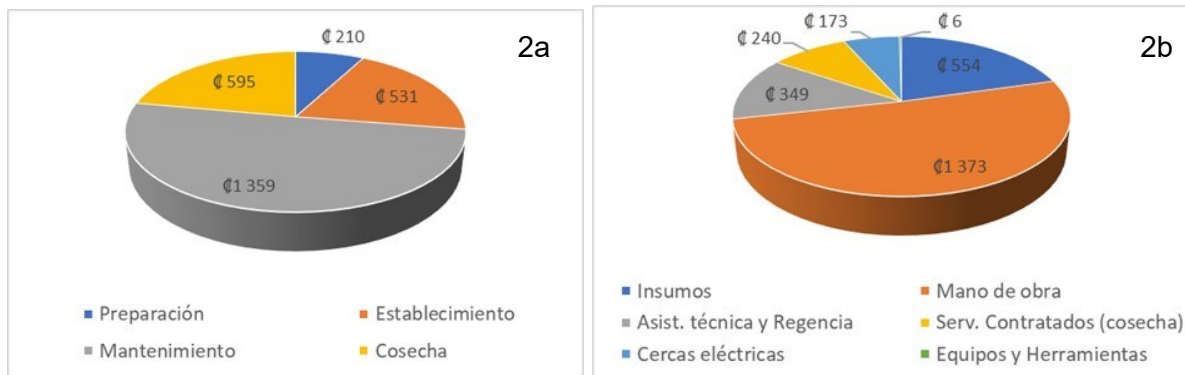


Figura 2: Costo total en colones por árbol individual (¢ 2695, donde 1US\$ = ¢635) distribuido por actividad (2a) y por rubro (2b), para el ciclo completo (16-18 años) de cultivo de **teca** en franjas (6m de ancho x 1600m de largo, N = 2000) en sistemas silvopastoriles en Costa Rica.

## Referencias

Calvé, S., Murillo, O., Salazar, L., Córdoba, D. 2020. Aporte económico de la madera de cedro (*Cedrela odorata* L.) como árbol de sombra en cafetales de Pérez Zeledón, Costa Rica. Rev. For. Mesoam. Kurú 17 (41): 68-77.

Fallas, Juan Luis. 2017. Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (*Tectona grandis* L.f) en Costa Rica. Tesis M.Sc. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica.

Murillo, O., Badilla, Y. 2015. Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago de servicios ambientales para la medición de la biomasa, para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono. FONAFIFO. San José, Costa Rica. 108 p.

Murillo, O., Leitón, M., Ospino, M., Badilla, Y., Paniagua, W., Valverde, A., Corea, E. 2015. Hacia un nuevo sistema silvopastoril. San José, Costa Rica. Colegio de

Ingenieros Agrónomos. Revista Germinar Año 5 (Vol. 17): 16-17.

Paniagua, W., Murillo, O., Mora, G., Ospino, M., Valverde, A., Badilla, Y., Rojas, A., Campos, C., Corea, E. 2018. Sistemas Silvopastoriles con Árboles Maderables de Alto Valor Económico. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ing. Agronómica. San Carlos, Costa Rica. 20p.

Quirós, Sofía. 2015. Modelos de crecimiento y rendimiento para plantaciones clonales de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Costa Rica. Tesis Lic. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica.

Vallejos, Jonathan. 2018. El cultivo del pilón (*Hieronyma alchorneoides* Allemão) en Costa Rica. Maestría académica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica.

Elaboración técnica

Olman Murillo

Yorleny Badilla

Joshua Jiménez

Escuela de Ingeniería Forestal

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Presentación utilizada en charlas virtuales y en la Webinar internacional organizada por la Unidad de Vinculación de la EIFO (mayo y setiembre 2021)

**ALIANZA  
TEC + CORFOGA  
+ FONAFIFO**

**Cultivo de maderables en  
sistemas silvopastoriles**

Asociación Forestal  
TEC

Genforos

Corporación Ganadera  
CORFOGA

FONAFIFO

Olman Murillo  
Yorleny Badilla  
Joshua Jiménez

Marcelo Palas  
Yasmín Castilla

**Sistema Silvopastoril (SSP)**

Modelo productivo donde se combina un negocio de producción ganadera y un negocio de producción de madera, donde los árboles brindan adicionalmente otros servicios ambientales, como sombra, fijación de carbono, biodiversidad, rompevientos, belleza escénica, entre otros.

Árbol

Animal

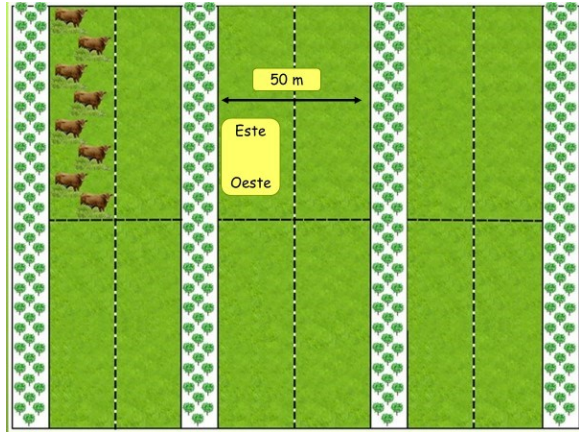
Pasto

Iniciamos investigaciones sobre un nuevo diseño SSP + buscando carbono neutralidad (2014-2017) TEC + UCR + UNA incorporar mayor impacto socio económico

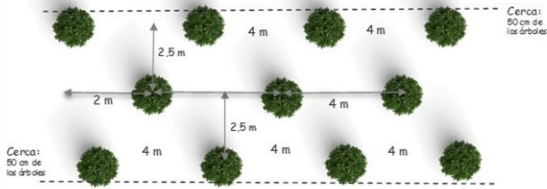
Wilfrido Paniagua Madrigal  
Olman Murillo Gamboa  
Maria Gabriela Mora Mora  
Mónica Ospino Araya  
Anthony Valverde Abarca  
Yorlery Badilla Valverde  
Augusto Rojas Bourillon  
Carlos Campos Granados  
Eugenio Corea Anias



SISTEMAS SILVOPASTORILES CON ÁRBOLES MADERABLES DE ALTO VALOR ECONÓMICO



Distribución espacial de los árboles dentro de la franja de 6m de ancho, con tres hileras de árboles. En 100 m de longitud se pueden plantar 75 árboles: 25 + 25 + 25  
San Carlos, zona norte de Costa Rica



**Investigación**

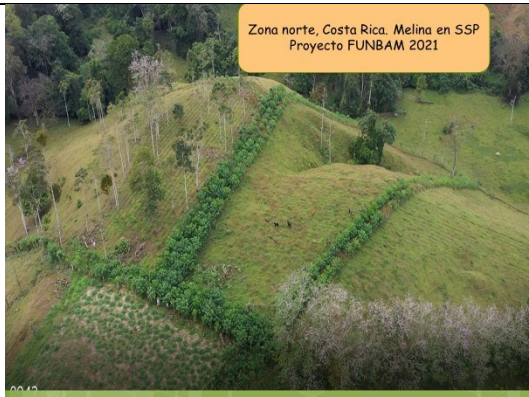
Se evaluó durante 5 años 6 espaciamientos dentro de cada hilera: 6m, 5m, 4m, 3m, 2m y 1m. Pocas diferencias en calidad y volumen comercial del árbol del centro con respecto a la hilera izquierda o derecha.



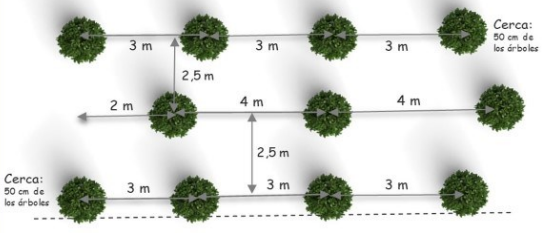
Clones de melina  
San Antonio, Pérez Zeledón  
Finca Geovanni Villegas



Zona norte, Costa Rica. Melina en SSP  
Proyecto FUNBAM 2021



Observamos que en las dos líneas de borde los árboles crecían más que en la línea central, pero recibían más daño de viento, quebradura de copa. Se modificó la distancia a 3 x 3m en estas dos líneas de borde. Con esto se aumentó de 75 árboles a 91 árboles en una franja de 100 m de longitud: 33 + 25 + 33



- En zonas húmedas y pluviales plantamos
- Exóticas**  
Teca, melina, Acacia (sombra), Pino (sombra)
- Nativas**  
Cordia a. (Laurel), Dipteryx p. (Almendra), Cedrela o. (cedro), Enterolobium c. (Guanacaste), Samanea s. (cenizaro, semi perenne) y Hieronyma a. (pilón, sombra).
- En zonas secas (Pacífico norte)
- Exóticas**  
Teca, melina, Acacia (sombra), Pino (sombra)
- Nativas**  
Cedrela o. (cedro), Enterolobium c. (Guanacaste) y Samanea s. (cenizaro, semi perenne)

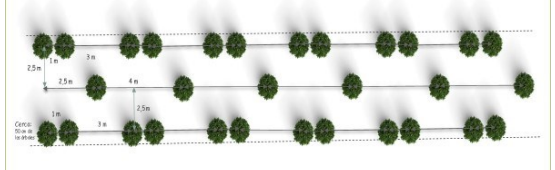
Los buenos colegas continúan innovando. En Sarapiquí (Zona norte) el Dr. Dagoberto Arias (TEC) nos comparte esta interesante experiencia con melina



**Modificamos de nuevo el diseño:** se planta a 4 x 4m en las dos líneas de borde, pero se plantan 2 árboles juntos separados por 1m. Con esto se aumentó de 91 árboles a 125 árboles en 100 m de longitud de la franja: 50 + 25 + 50.  
En 500m de franja = N = 750.

Ahora tenemos más árboles, más carbono, más madera, y hasta un posible raleo del 50% en las hileras de borde, a los 5-6 años.

Este nuevo diseño ofrece además un nuevo servicio ambiental: **ROMPEVIENTOS**



Un productor de carne nos preguntó: **¿Y LA SOMBRA EN EL VERANO?**

Toda la evidencia científica demuestra el efecto del shock térmico en la fisiología de los animales, menor ganancia en peso diario, menor tasa de preñez, etc.

Se propuso entonces esta modificación al diseño, que puede ser también utilizado para incluir temas como mayor biodiversidad, conservación de la naturaleza, paisajismo, etc

### Investigaciones en marcha

- 1) Curvas de crecimiento por especie.
- 2) No de árboles para **Carbono Neutralidad**
- 3) Teca (bordes) con Melina (centro) y viceversa.
- 4) **Cedro** cada 12m en la línea central.
- 5) Leguminosas de copa amplia en la línea del centro (Guanacaste y cenizaro).
- 6) **Mejoramiento genético**: el árbol plus debe ser apto para crecer en condiciones de franja: **resistencia a viento**, **copa angosta**, rama corta, tronco recto, dominancia apical, otros).
- 7) Mayor **densidad** para promover raleos.
- 8) **SSP** para zonas altas del país.

iiNace toda una silvicultural!

Potencial enorme para cultivar madera en el 30% del país

### Financiamiento de los Sistemas Silvopastoriles

Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO)

1. Inicia con crédito forestal (5 a 6% hasta con 3 años de gracia)
2. El crédito otorga **₡3500 POR ARBOL** (US\$5,6), 60% al inicio, 20% al final del año 1 y el otro 20% al final del año 2, con supervisión de campo.
3. Al año 3 ingresa el PSA y otorga un 50%. Con esto se pagan los intereses y se amortiza parte del préstamo.
4. Al año 5 ingresa el otro 50% del PSA y vuelve a amortizar al préstamo. Con los raleos se espera terminar de cancelar el saldo del crédito.
5. Por ahora solo para pequeños y medianos productores

### Hablemos de Captura de Carbono y Mitigación

Recordemos que tenemos 1 Franja de 100m de largo con 125 árboles

Especie	I Raleo		II Raleo		Cosecha Final			Ingresos (\$/ha)			
	Edad	N	Edad	N	Edad	N	VolCom total/ha				
Teca ( <i>T. grandis</i> )	Año 5,	42	1.23	Año 9,	30	5.55	Año 15,	45	36.74	43.53	7902
Melina ( <i>G. arborea</i> )	Año 3,	42	4.06	Año 5,	75		Año 5,	75	39.18	43.25	7421
Almendra ( <i>Dipteryx</i> )	Año 5,	42	0.88	Año 10,	30	2.08	Año 15,	45	10.23	13.19	4135
Pilón ( <i>H. alchorneoid</i> )	Año 5,	42	0.87	Año 10,	30	2.69	Año 15,	45	17.69	21.25	1544

Especie	VolCom total/ha	Ingresos (\$/ha)	Biomasa Total/ha	Carbono (Ton/ha)	Ton/ha/año 15 años
Teca ( <i>T. grandis</i> )	43.53	7902	65.30	15.80	1.05
Melina ( <i>G. arborea</i> )	43.25	7421	194.61	35.96	2.40
Almendra ( <i>Dipteryx</i> )	13.19	4135	19.78	6.96	0.46
Pilón ( <i>H. alchorneoid</i> )	21.25	1544	31.87	8.41	0.56

Emisiones del ganado en 10ha, 25 cabezas	1 Franja	2 Franjas	% mitigación 1 Franja/ha	% mitigación 2 Franjas/ha	N para alcanzar Carbono Neutralidad
34.78 Ton/ha/año	10.53	21.07	30.29	60.58	365
teca	10.53	21.07	30.29	60.58	365
melina	23.98	47.95	68.93	137.86	150
almendra	4.64	9.28	13.35	26.69	1000
pilón	5.61	11.22	16.13	32.26	730

50% melina = 23,98Ton/ha  
 50% teca = 10,54 Ton/ha  
 Total = 34,51 Ton/ha

67% melina = 31,65 Ton/ha  
 33% Almendra = 3,15 Ton/ha  
 Total = 34,80Ton/ha

Rentabilidad del establecimiento de franjas de madera con melina y teca en sistemas silvopastoriles, zona norte de Costa Rica (Ospino, Murillo, Alfaro, en prensa)

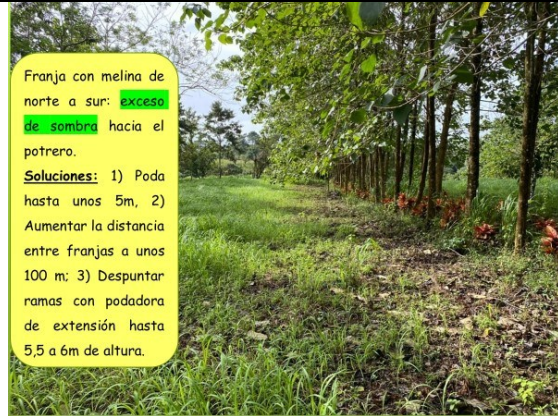
Tasa de interés del 6%	Pago del capital (años)	1-10
Melina	VAN (€)	1 131 349
	US (\$)	1,984
	B/C	2,68
	TIR	28,46%
Teca	VAN (€)	889 628
	US (\$)	1,560
	B/C	2,41
	TIR	14,9%

Algunas dificultades detectadas

El ganadero no es un agricultor tradicional. No tiene por costumbre el cuidado de plantas. Ahora se le indica que debe eliminar el pasto periódicamente dentro de la franja. Este es el principal desafío, ¿cómo lograr eliminar la gramínea dentro de la franja!



Franja con melina de norte a sur: exceso de sombra hacia el potrero. **Soluciones:** 1) Poda hasta unos 5m, 2) Aumentar la distancia entre franjas a unos 100 m; 3) Despuntar ramas con podadora de extensión hasta 5,5 a 6m de altura.



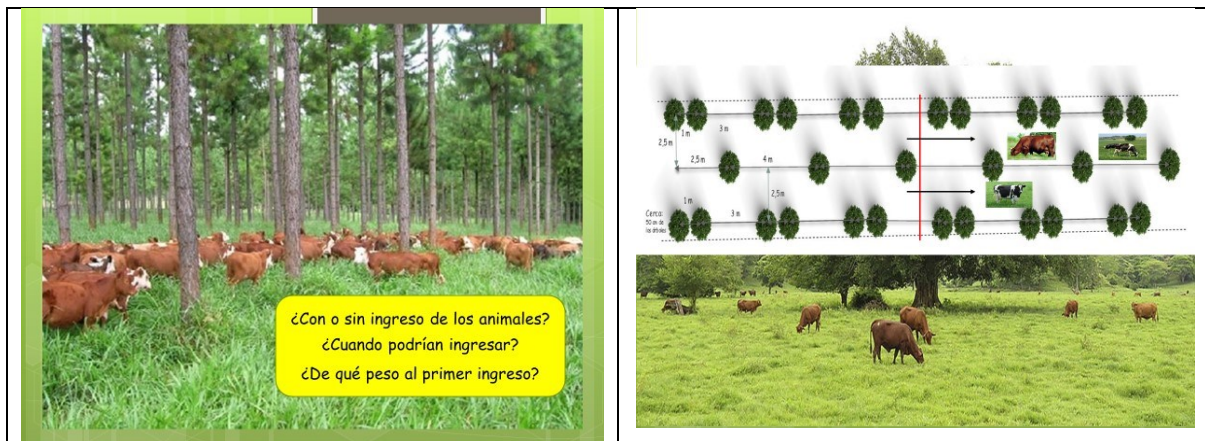
Un ganadero estableció la franja a 2m de la cerca colindante. No realizó la poda de ramas bajas de melina (5m): El madero negro de la cerca viva empezó a morir bajo la fuerte sombra. **Aprendizaje:** 1) evitar establecer franjas en líneas o cercas colindantes con vecinos; 2) Podar las ramas hasta 5 o 7,5m de altura



Las fincas ganaderas suelen tener suelos muy compactados, erosionados, con quemas frecuentes, en especial en los linderos

Muchas veces no es posible mecanizar, pero la hoyadora es una excelente opción





**Objetivo Específico 3:** TEC, Optimizar la productividad del componente forestal de los SSP. Para el desarrollo de este objetivo se establecieron parcelas permanentes de crecimiento y comportamiento de los nuevos diseños SSP. Con cada uno de los productores se establecieron entre 6 y 12 PPM. En todas las fincas nuevas se llevaron mediciones periódicas (cada 3 a 6 meses) durante casi 3 años continuos. A pesar de ser información de poca edad, los resultados de crecimiento se pudieron contrastar con los modelos de crecimiento mensual de teca y melina para los primeros cinco años (Murillo *et al.* 2016).

También se le dio seguimiento al ensayo de 6 espaciamientos de teca, establecido en la Finca La Vega hace 8 años. Con toda la información se preparó un primer borrador de publicación sobre crecimiento y producción esperada, principalmente para teca y melina. De las demás especies nativas no hay suficientes datos.

Debe mencionarse que la información desarrollada sobre crecimiento, costos, indicadores financieros y escenarios de financiamiento ha sido conocimiento generado por el proyecto y esencial para el logro de objetivos de productividad y fomento.

### 1. Tesis desarrollas con el aporte total o parcial del proyecto

Jiménez Jiménez, J. 2023. Optimización del componente forestal del programa nacional de fomento de sistemas silvopastoriles carbono-neutral. Tesis M.Sc. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ing. Forestal. Cartago, Costa Rica.



## **2. Crecimiento esperado, ingreso económico y carbono fijado con la siembra de árboles en franjas en la zona norte de Costa Rica.**

**Murillo, Badilla, Paniagua, Rodríguez y Ospino.**

### **Resumen**

**Palabras clave:** agroforestería, silvopastoril, carbono, productividad, espaciamientos

### **Abstract**

**Key words:** agroforestry, silvopastoril, carbon, productivity, spacements

### **Introducción**

La ganadería en Costa Rica es una actividad productiva tradicional que se desarrolla en todo el territorio nacional desde la época colonial (CORFOGA 2015). Actualmente un 43,4% (1,86 millones ha) del territorio corresponde a tierras ocupadas por pastos, según el último censo agropecuario nacional (INEC 2014). Sin embargo, la mayor parte de estas áreas son utilizadas actualmente en sistemas de ganadería extensiva, con baja tecnología, que provocan un deterioro ambiental y emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que favorecen el calentamiento global (FAO, 2013).

El país tiene como meta alcanzar la carbono neutralidad y todos los sectores deben aportar a esta causa desde sus posibilidades y realidad socioeconómica. Por ser la ganadería el uso del suelo más extensivo en el territorio nacional, su peso e importancia en el equilibrio ambiental del país, debe constituirse sin duda en la base de las políticas de mejora del agropaisaje. Por tanto, es prioritaria la búsqueda de soluciones, nuevos modelos productivos, que permitan invertir en la mejora de estos sistemas de producción ganadero. Es esencial la puesta en marcha de tecnologías basadas en mejores prácticas de manejo, que reduzcan emisiones, contribuyan a la remoción de gases de efecto invernadero y aumenten el impacto socioeconómico de los productores locales.

Los sistemas silvopastoriles (SSP) asocian en principio, el componente forestal con el forrajero y permiten la integración con la producción de carne o leche (Murillo *et al.* 2013). Su promoción ha ocurrido durante décadas y un abundante conocimiento ha sido generado al

respecto (Ibrahim et al., 2007; Casasola et al., 2009). Sin embargo, no ocurrió una verdadera adopción del sector forestal en el sector ganadero tradicional como se esperaba. Es común encontrar diferentes modalidades de SSP dentro de las fincas ganaderas (cortinas rompevientos, árboles en hileras o linderos, y árboles dispersos en potrero) (Villanueva *et al.* 2010). Sin embargo, estas modalidades de asocio tradicionalmente no contribuyen significativamente en la economía de las fincas (Murgueito e Ibrahim 2008). El componente forestal del modelo silvopastoril propuesto por Murillo *et al.* (2015), consiste en un diseño que permite la inclusión de franjas de especies forestales de alto valor de su madera, intercaladas dentro de la unidad de producción pecuaria, con el propósito de desarrollar un SSP, social, económica y ambientalmente sostenible.

La información de crecimiento y producción de madera es fundamental para lograr el desarrollo de propuestas de fomento de cualquier actividad económica con árboles. Los estudios que han generado información económica de algunas modalidades de SSP (Souza, 2002), se basan en una ganadería arbolada y no de un enfoque silvopastoril que permita la producción alternativa de madera. Este estudio busca por tanto, aportar conocimiento nuevo sobre el potencial de producción de madera e ingresos económicos al productor agropecuario en un nuevo enfoque SSP para el país.

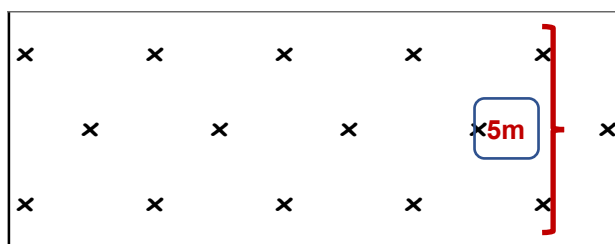
## **Metodología**

La investigación se realizó en la finca productiva del Instituto Tecnológico de Costa Rica en la zona conocida como La Vega, Florencia de San Carlos. La zona se ubica dentro de la Zona de Vida Bosque Muy Húmedo Tropical del sistema Holdridge, de clima cálido, con temperatura promedio anual entre 25 y 33 °C, precipitaciones promedio de 3500 a 4000 mm/año, con un periodo seco prácticamente nulo, y una altitud de 50 msnm. Los suelos sufren de inundaciones periódicas, son de tipo franco arcilloso, fertilidad media (CICE de 18,43 cmol), de baja saturación de acidez (2,66%) y un pH de 5,0 a 5,6.

## **Diseño experimental**

El estudio estableció en campo un nuevo diseño silvopastoril basado en la siembra de franjas angostas de 6m de ancho, plantada en su interior con tres hileras de árboles en tresbolillo con especies de alto valor maderable. Se evaluaron las especies forestales de mayor importancia económica maderable en la zona y el país en general: teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*), pilón (*Hieronyma alchorneoides*) y almendro (*Dipteryx panamensis*).

Las franjas se establecieron aproximadamente cada 45-50 m entre sí para evitar un sombrero excesivo sobre el área efectiva de pastura (Figura 1), dado que su orientación en el terreno fue de Noroeste-Sureste. Dentro de cada franja se plantaron tres hileras de árboles a lo ancho, distanciadas a 2,5m entre sí. Dentro de cada hilera se plantaron los árboles en varios espaciamientos, con un diseño experimental de bloques completos al azar, con 15 árboles por unidad experimental. Los 6 tratamientos (espaciamientos) evaluados fueron cada 1 metro, 2m, 3m, 4m, 5m y 6m de distancia dentro de la hilera de árboles (Figura 1). Las franjas funcionaron como bloques y se establecieron 3 franjas en total para cada una de las especies forestales evaluadas.



**Figura 1:** Distribución espacial de la unidad experimental de 15 árboles dentro de las franjas de 6m de ancho, con 3 hileras en distribución tresbolillo, en el sistema silvopastoril propuesto en San Carlos, zona norte de Costa Rica (Murillo et al. 2015).

Estos espaciamientos corresponden a una relación de densidad de árboles/ha como se muestra en el cuadro 1. En un modelo de alta producción es posible entonces establecer 2 franjas/ha, con 6m de ancho cada una. Esto implica una relación de  $6m + 6m = 12m$  destinada a la producción de madera dentro de una ha imaginaria, o también, un 12% de la superficie de producción ganadera.

Cuadro 1: Distancias de siembra evaluadas entre árboles dentro de hileras, en el ensayo silvopastoril en San Carlos, zona norte de Costa Rica.

2,5m entre hileras, 3 hileras dentro de cada franja	Distancia entre árboles dentro de cada hilera					
	1m	2m	3m	4m	5m	6m
Número de árboles/franja de 100 m de	300	150	100	75	60	50

longitud						
Número de árboles en 2 franjas/ha de 100m de longitud	600	300	200	150	120	100

Se diseñó un sistema silvopastoril que permitiera producir madera en franjas angostas de terreno dentro de las unidades de producción ganadera. El ancho de la franja se optimizó de modo que permitiera la mayor cantidad de líneas de árboles en el interior de la estrecha porción de terreno. De esta manera, se buscó que la relación costo/beneficio de la necesaria instalación de cercas alrededor de los árboles, lograra mantener una apropiada relación positiva económicamente.

Basados en esta densidad de árboles posibles a plantar/ha, se tomaron modelos de crecimiento y de fijación de biomasa/carbono existente para cada una de las especies evaluadas en el proyecto (Murillo y Badilla 2015). De estos modelos de crecimiento y de manejo de cada especie se adaptó a la densidad propuesta en los sistemas silvopastoriles, como se muestra en el cuadro 1.

La relación volumen/carbono se obtuvo de la ecuación general de densidad de biomasa, que establece que  $\text{Ton/ha} = \text{Volumen} * \text{DM} * \text{FEB}$ , donde el volumen total se convierte en biomasa (multiplica por la DM = Densidad Media de la madera) y luego por el Factor de Expansión (FEB = 1,5 de acuerdo con el IPCC, 2003, Tabla 3.A.1.10). Una vez estimada la biomasa aérea total por ha, se estimó la proporción de carbono basado en la relación 44% de la biomasa aérea total propuesta por Esquivel y Fernández (2013).

La biomasa de raíces se ha propuesto utilizar una relación del 25% de la biomasa aérea total, válida para una gama amplia de especies (IPCC, 2006). Sin embargo, se consideró utilizar un escenario más conservador y basar los análisis de fijación de carbono solamente con base en la biomasa aérea de los árboles.

Cuadro 1: Modelo convencional de manejo de plantaciones forestales en Costa Rica y relación Volumen total/Carbono (Murillo y Badilla 2015).

Especie	Ciclo de producción (años)	Número inicial de árboles/ha	Raleos (años)	Volumen total/ha (m <sup>3</sup> )	Carbono/ha (Ton)
---------	----------------------------	------------------------------	---------------	------------------------------------	------------------

<i>Tectona grandis</i>	18	833	4, 8, 12	225	115
<i>Gmelina arborea</i>	6	715	3 y 4,5	275	102
<i>Dipteryx panamensis</i>	16	833	5, 9, 12	150	120
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	16	833	5, 9, 12	150	111

Estos valores de volumen total/ha y el respectivo carbono fijado, corresponden a la sumatoria del volumen aprovechado en cada raleo y el volumen final de cosecha, acorde con el modelo de manejo más generalizado para estas especies en el país.

## Resultados y discusión

Con base en la densidad de árboles/ha en un sistema silvopastoril (150/ha), se ajustó los valores de volumen y carbono de los modelos convencionales existentes para cada especie en el país. En el cuadro 2 se muestra en detalle el resultado del estimado de volumen y carbono fijado por especie en un sistema silvopastoril. Es importante señalar, que este valor incluye el volumen de los árboles raleados en su momento, dependiendo del manejo esperado y el crecimiento para cada especie.

**Cuadro 2:** Estimación del carbono total fijado esperado por ha, en sistemas silvopastoriles con franjas de madera de las especies de mayor uso en reforestación en Costa Rica.

Especie	I Raleo		II Raleo		Cosecha Final		Vol total/ha	Ingresos (\$/ha)	Carbono (Ton/ha)	Ton/ha/año
	Edad	N Vol/ha	Edad	N Vol/ha	Edad	N Vol/ha				
Teca ( <i>T. grandis</i> )	Año 5, 50	2.52	Año 9, 40	7.16	Año 15, 60	27.68	37.36	7276	13.56	0.90
Melina ( <i>G. arborea</i> )	Año 4, 60	7.25			Año 7, 90	55.22	62.48	4620	17.32	2.47
Almendra ( <i>D. panamensis</i> )	Año 5, 50	1.06	Año 10, 40	3.53	Año 15, 60	11.32	15.91	2789	8.40	0.56
Pilón ( <i>H. alchorneoides</i> )	Año 5, 50	0.97	Año 10, 40	4.55	Año 15, 60	16.47	22.00	1664	8.71	0.58

En el cuadro 2 puede observarse que la melina (*Gmelina arborea*) es la especie que tiene la tasa anual de fijación de carbono más alta, a pesar de que su madera es la de menor densidad en este grupo de especies. Esto se explica por su alta producción de volumen/biomasa en ciclos de producción de 7 años, vs ciclos de 15 años en las demás especies. Este árbol fija más del triple de carbono/ha/año que cualquiera de las otras especies investigadas.

Si en la finca se plantan los árboles anualmente en un sistema continuo, los ingresos esperados/ha/año son de \$485 (teca), \$660 (melina), \$186 (almendra) y \$111 (pilón) respectivamente. El almendra es un caso especial por la dureza y resistencia a la intemperie de su madera. Con esta especie se podría esperar que los productos del primer raleo y las partes delgadas del tronco, se pudieran aprovechar como postes de cerca, que tienen un valor

en el mercado superior a los ₡3000 la unidad.

Puede claramente deducirse, que el cultivo de madera en estas franjas dentro de sistemas de producción ganadero, aportará una importante cantidad de toneladas de carbono/año al sistema. Las estimaciones de incremento del volumen y biomasa de cada especie serán revisadas en el futuro cercano, en la medida que se obtenga los valores de crecimiento de los árboles en estos sistemas de campo abierto. Es de esperar que la tasa de crecimiento del diámetro y del volumen en general del árbol, sea aún superior debido a la poca competencia que tendrá en estas franjas. Estos resultados sugieren que la tasa real de carbono estimada en este estudio se encuentre subvalorada.

Los efectos económicos de los árboles de alto valor en el sistema, son sin duda el otro elemento a considerar. La crisis de los ganaderos debido a los cambios en el precio y mercado de la carne, podría ser significativamente compensado si se aprovecha la madera en pie que ofrece este diseño propuesto. A estos criterios debe sumarse el impacto positivo de la existencia de sombra en la producción de ganado, elemento reconocido y valorado en otros trabajos. Donde se ha estimado que la sombra de los árboles en potrero puede mejorar la producción de leche y carne en hasta un 15 a un 20% (Souza, M. 2002).

Finalmente, debe recordarse también los beneficios ambientales de los árboles como alimento de avifauna, servicios escénicos y paisajísticos, que cada vez más son considerados de gran valor en la sociedad (Casasola *et al.* 2009).

## **Conclusión**

El diseño propuesto de franjas de madera en sistema silvopastoril, permite producir un importante volumen comercial que oscila entre los 15 a 62 m<sup>3</sup>/ha, según la especie, y fijar entre 0,5 y aproximadamente 2,5 toneladas de carbono/ha/año.

## **Agradecimientos**

Al programa de mejoramiento genético forestal GENFORES del Centro de Investigaciones e Innovación Forestal del Instituto de Costa Rica, a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del ITCR por el apoyo financiero, material y humano a la presente investigación.

## **Literatura**

Casasola, F.; Ibrahim, M.; Sepúlveda, C.; Ríos, N.; Tobar, D. 2009. Implementación de

sistemas silvopastoriles y el pago de servicios ambientales en Esparza, Costa Rica: una herramienta para la adaptación al cambio climático en fincas ganaderas. p. 169-188. En Ibrahim, M. & Sepúlveda, C. (eds.). Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas como una medida de adaptación al cambio climático en América Central. Centro Agronómico Tropical (CATIE). Turrialba, Costa Rica.

CORFOGA (Corporación Ganadera). (2015). La ganadería sostenible en Costa Rica es una realidad. San José CR, CORFOGA .1 video.

Esquivel B., D.J. y Fernández, R., MJ. 2013. Diversidad Arbórea y Cuantificación del Carbono Fijado en los Ecosistemas Forestales, Universidad EARTH, Campus Guácimo, Limón.

FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y agricultura). (2013). Gran potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la ganadería San José, Costa Rica. Recuperado de <http://www.fao.org/news/story/es/item/198166/icode/>

Gutiérrez, T. 2016. Costos de producción empobrecen a agricultores nacionales. CR Hoy. San José, Costa Rica. Enero 2011.

Ibrahim, M.; Chacón, M.; Cuartas, C.; Naranjo, J.; Ponce, G.; Vega, P.; Casasola, F.; Rojas, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa aérea en sistemas de uso de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Agroforestería en las Américas 45:27–36.

INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2014). VI Censo Nacional Agropecuario. San José, Costa Rica. Resultados Generales. mayo 2015. San José, Costa Rica. 147 p.

IPCC, “Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Edited by Simon Eggleston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC ISBN 4-88788-032-4 (2006).

Méndez, E.; Beer, J.; Faustino, J.; Otárola, A. (2000). Plantación de árboles en línea. CATIE. Turrialba, Costa Rica.

MINAE, MAG, PNUD, (2013). Concepto de NAMA, Fincas ganaderas de Costa Rica, MINAE. San José, Costa Rica.

Mora, V. (2001). Pastoreo bajo plantaciones. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), San José, Costa Rica.

Murillo, O.; Paniagua, W.; Badilla, Y.; Rojas, A.; Arce, J.; Corea, E. (2013). Modelo silvopastoril orientado a la reducción de la huella de carbono y al aumento de la productividad económica. Proyecto interuniversitario CONARE. Cartago, Costa Rica.

Murillo, O.; Badilla, Y. (2015). Informe Final de Consultoría: Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago de servicios ambientales para la medición de la biomasa, para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono. FONAFIFO. San José, Costa Rica.  
Murillo, O.; Badilla, Y.; Rojas, F.; Torres, G.; Carvajal, D.; Canessa, R. 2015a. Informe final de proyecto de investigación “Cultivo de especies maderables nativas de alto valor para pequeños y medianos productores”. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica.

Murillo, O.; Leitón, M.; Ospino, M.; Badilla, Y. Paniagua, W.; Valverde, A. (2015b). Hacia un nuevo sistema silvopastoril. San José, Costa Rica. Colegio de Ingenieros Agrónomos. Revista Germinar. Año 5 (Vol 17): 16-17.

Murillo, Olman; Badilla, Yorleny. 2015. Consultoría. Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago de servicios ambientales para la medición de la biomasa, para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono. FONAFIFO. San José, Costa Rica. 108 p.

Murillo, Oltan; Vallejos, Johnatan; Badilla, Yorleny; Guzmán, Nancy; Luján, Ricardo; González, Ernesto. 2016. Crescimento efetivo mensal inicial em plantações de teca (*Tectona grandis*) em Costa Rica. Revista Nativa (Brasil) vol 4(2): 87-90.

Murgueito, E.; Ibrahim, M. (2008). Ganadería y medio ambiente en América Latina, Ganadería del futuro: investigación para el desarrollo. Fundación CIPAV. Cali, Colombia.

Murgueito, E. (2009). Incentivos para los sistemas silvopastoriles en América Latina. Revista Avances en investigación agropecuaria no 13(1): 3-18 p.

Omar, D.; Laércio, C. (1999). Agroforestería para la producción animal en América Latina, FAO, No 143, p 421-438.

Ospino, M., Murillo, O., Alfaro, M., Leitón, M., Paniagua, W., Badilla, Y. En prensa. Estructura de costos del componente forestal en un sistema silvopastoril en la zona norte de Costa Rica.

Paniagua, W.; Mora, G.; Badilla, Y.; Murillo, O.; Rojas, A.; Campos, C.; Corea, E.; Ospino, M.; Lazo, G. (2015). Manual para el establecimiento de un Sistema Silvopastoril utilizando arboles maderables de alto valor económico. ITCR-UNA-UCR. San Carlos, Costa Rica.

Sánchez, F. (2001). Manual simplificado del cercado eléctrico: Guía sencilla para la selección, instalación, operación, mantenimiento de los cercos eléctricos operados con energía fotovoltaica. Chiapas, México.

Souza de Abreu, Maria Helena. 2002. Contribution of trees to the control of heat stress in dairy cows and the financial viability of livestock farms in humid tropics. PhD. Thesis. Turrialba, Costa Rica. CATIE.

Villanueva, C.; Ibrahim, M.; Murgueito, E. (2010). Producción y rentabilidad de sistemas silvopastoriles: Estudios de caso en América Central. CATIE. Turrialba, Costa Rica.



### **3. Efecto del espaciamiento en el desarrollo de la teca en sistema silvopastoril en franjas, San Carlos, Costa Rica**

Murillo, O., Badilla, Y., Jiménez, J.

#### **Resumen**

Gran parte de las fincas ganaderas de Costa Rica son manejadas bajo el concepto de ganadería tradicional, que desaprovecha el uso de recursos y ocasiona el incremento de la huella de carbono. Estrategias de sistemas silvopastoriles (SSP) tienen como objetivo la sinergia del sector ganadero y el sector forestal para el desarrollo de propuestas de ganadería verde. Pequeños y medianos productores se encuentran dentro del objetivo meta, ya que la diversificación de sus fincas impulsa el potencial de retribución económica y un mayor aporte de servicios ambientales. La densidad de siembra en el diseño espacial en franjas puede inferir significativamente sobre los resultados productivos, en términos de volumen, y calidad de los árboles, con su efecto final en la retribución económica para el ganadero. El objetivo del estudio fue determinar el efecto de la densidad de siembra en la producción y calidad de madera en un sistema silvopastoril en franja en San Carlos, zona norte de Costa Rica. Se investigó un ensayo con 6 espaciamientos, 2,5 x 6m, 2,5 x 5m, 2,5 x 4m, 2,5 x 3m, 2,5 x 2m y 2,5 x 1m, en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, en un sistema silvopastoril en franjas angostas de 6m de ancho. Los datos analizados corresponden con las mediciones desde 1,5 hasta 8,3 años de edad. Se analizó el crecimiento del diámetro, altura comercial y volumen comercial de los árboles, así como su calidad. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los espaciamientos, donde una densidad de siembra baja promueve la disminución en calidad, mientras que una densidad alta afecta el crecimiento diamétrico. El espaciamiento 2,5 x 3m (N = 100 árboles en 100m de franja) fue el que registró el mejor crecimiento y calidad de árboles de teca en este sistema silvopastoril.

**Palabras Claves:** Densidad de siembra, calidad de árboles, sistemas agroforestales, arreglo espacial

#### **Abstract**

Most of the livestock farms in Costa Rica are managed under the concept of traditional cattle ranching, which does not take advantage of the adequate use of resources and causes an increase in the carbon footprint. Strategies for silvopastoral systems (SSP) are aimed at the synergy of the livestock and forestry sectors for the implementation of green livestock

proposals. Small and medium-sized producers are within the target objective, since the diversification of their farms boosts the potential for economic retribution and the improvement of environmental services. The influence of planting densities in the spatial design of strips affects the productive results in terms of volume, and variables such as tree quality can also influence the economic retribution. The objective of the study was to determine the existence of differences in planting density in strips of a silvopastoral system in San Carlos, Costa Rica, in addition to identifying the density that optimizes the production of better-quality volume. 6-density spacings were investigated 2.5 x 6m, 2.5 x 5m, 2.5 x 4m, 2.5 x 3m, 2.5 x 2m y 2.5 x 1m, with 3 replications in a randomized block design. Behavioral analysis was carried out for the variables: diameter, quality, height and commercial volume of the trees, based on growth measurements from 1.5 to 8.3 years old. The results showed that there is a relationship between planting density and the variables analyzed; low planting densities promote a decrease in quality, while higher densities have a suppressive effect on the diameter variable. There is a significant difference between the density treatments and the variables studied. The design that best optimizes production is represented by the 2.5x3m planting density (N = 100 trees in a 100m strip long) in a silvopastoral system.

**Key words:** Planting density, tree quality, agroforestry systems, spatial arrangement.

## **Introducción**

En el país, aproximadamente el 43% de las fincas agropecuarias son destinadas al cultivo de pasto [1]. Gran parte de estas fincas se encuentran gestionadas bajo el concepto de ganadería tradicional o extensiva, con cargas del hato ganadero que limitan las posibilidades de mitigación del gases de efecto invernadero en la industria cárnica y lechera [2].

El concepto de sistema silvopastoril (SSP) se fundamenta en la asociación de la actividad ganadera con la actividad forestal [3], no obstante la posibilidad de arreglos espaciales dependerá en gran parte de las necesidades y objetivos de producción fijados para la finca. Algunas opciones como árboles dispersos en potreros, cortinas rompevientos, cercas vivas y linderos [4], [5], representan el modelo tradicional de SSP. No obstante, esta forma de incorporación del árbol limita la contribución económica en la finca ganadera [6].

El desarrollo de la franja arbórea como arreglo espacial dentro de la finca ganadera, puede ofrecer una mejor prestación en términos productivos. Sin embargo, el entender el efecto de la densidad de siembra es importante para llegar a consolidar un arreglo espacial enfocado hacia la producción de madera para la industria.

Es de conocimiento general que en la plantación forestal la densidad de siembra infiere de

forma directa sobre las variables dasométricas [7]. No obstante, de forma intrínseca se puede generar algún efecto que recaiga sobre la calidad del árbol. con lo que impactaría el valor económico de la plantación y su madera.

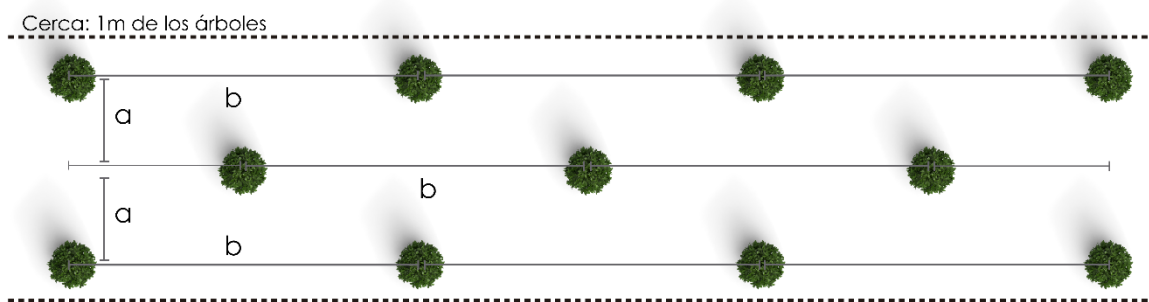
Para el pequeño y mediano productor ganadero es esencial consolidar un diseño de SSP, que defina la densidad que maximice la producción de volumen de alta calidad. De forma que brinde la oportunidad de diversificar la finca con una propuesta de inversión con potencial de rentabilidad económica.

Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo determinar la mejor densidad de plantación de árboles en franja, como parte de un sistema silvopastoril ubicado en la zona norte del país.

### Metodología

La investigación se realizó en ensayos de sistema silvopastoril (SSP) establecidos en el 2014, en La Vega, Florencia, San Carlos, propiedad del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

El componente forestal del SSP consistió en árboles ubicados en tres hileras en tresbolillo dentro de una franja compacta de 7m de ancho. Entre hileras se estableció una separación de 2,5m de ancho (Figura 1). Se evaluaron seis tratamientos de densidad 2,5 x 6m, 2,5 x 5m, 2,5 x 4m, 2,5 x 3m, 2,5 x 2m y 2,5 x 1m, en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.



**Figura 6.** Esquema de distribución de árboles y espaciamientos para la conformación de tratamientos (a= separación entre hileras, b= separación entre árboles dentro de las hileras).

Fue seleccionado teca (*Tectona grandis* L.f.) como especie para la conformación de los arreglos espaciales, ya que cuenta con uno de los paquetes tecnológicos más desarrollados en el uso de clones, orientado al mercado nacional e internacional de madera [8].

El estudio contempló mediciones anuales durante los primeros 5 años de edad (2017-2021). Se midió el DAP, cantidad y calidad de las primeras 4 trozas de acuerdo con la metodología para calidad de plantaciones de Murillo y Badilla [9], en una escala de 1 a 4, donde una calificación de 1 es para una troza de alta calidad para aserrío, mientras que una calificación

de 4 para una troza para leña y sin valor para aserrío. Las trozas se definieron de 2,5m de largo. Los datos registraron también la posición de la línea de árboles dentro de la franja, es decir, línea borde izquierdo, línea borde derecho, línea central.

El procesamiento de datos consistió en la determinación de la calidad del árbol en una escala de 1 a 100, la altura y el volumen comercial.

La estimación de la calidad porcentual del árbol se encuentra en función de la cantidad de trozas y las calidades de trozas que conforman el mismo, se obtuvo de la siguiente manera (ecuaciones 1, 2 y 3):

Para árboles con 2 trozas:

$$Cal_{100} = \left( 1 + \left( \frac{1 - ((T_1 * 0,6) + (T_2 * 0,4))}{3} \right) \right) * 100 \quad (1)$$

Para árboles con 3 trozas:

$$Cal_{100} = \left( 1 + \left( \frac{1 - ((T_1 * 0,45) + (T_2 * 0,33) + (T_3 * 0,22))}{3} \right) \right) * 100 \quad (2)$$

Para árboles con 4 trozas:

$$Cal_{100} = \left( 1 + \left( \frac{1 - ((T_1 * 0,4) + (T_2 * 0,3) + (T_3 * 0,2) + (T_4 * 0,1))}{3} \right) \right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

$Cal_{100}$ : calidad porcentual del árbol.

$T_i$ : Calidad de la troza donde  $i$  representa la ubicación de la troza en el árbol.

La interpretación de dicho valor se encuentra de forma porcentual, por lo tanto, valores cercanos al 100% representan árboles de mayor calidad.

La altura comercial se estimó con base en el número de trozas comerciales del árbol de 2,5m de longitud. Las trozas de calidad 1 y 2 acumulan toda la longitud, mientras que trozas de calidad 3, solamente un 50% de la longitud (1,25m). Las trozas de calidad 4 se consideraron sin valor comercial. La suma de valores aportados por cada una de las trozas que conforman el árbol es el equivalente a la altura comercial del mismo.

La estimación del volumen comercial por árbol se obtuvo mediante la fórmula general de volumen con factor de forma (ecuación 4) de  $ff = 0,65$  [10].

$$Vol_{com} = \frac{\pi}{4} * dap^2 * h * ff \quad (4)$$

Donde:

$Vol_{com}$ : Volumen comercial en metros cúbicos.

dap: diámetro a la altura del pecho en metros.

h: Altura comercial en metros.

ff: Factor de forma.

Posterior a la estimación de las variables de estudio, se realizó una depuración de la base de datos para eliminar datos atípicos o inconsistentes con la tendencia normal esperada.

### Análisis de datos

Para la totalidad de las variables evaluadas se realizó una comprobación de supuestos del análisis de varianza, para esto se corroboró la normalidad de los datos, se ejecutó la prueba de Shapiro-Wilks modificado a un nivel de significancia del 95%. Se verificó los supuestos de homocedasticidad y normalidad, así como el análisis gráfico de la tendencia de los datos y los residuos del modelo.

Para cada una de las variables se realizó un análisis de varianza por año. Finalmente, para los análisis de varianzas que demostraron significancia entre sus tratamientos se realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey a un nivel de significancia del 95%

### **Resultados**

Las pruebas para la comprobación de supuestos mostraron la afirmación normalidad de los datos, además afirman la presencia de homocedasticidad de varianzas para las variables dap, calidad y altura. En el caso de la variable volumen fue necesario realizar la transformación mediante la aplicación de logaritmo natural para la comprobación de los supuestos y el correcto análisis de esta.

### DAP

La variable dap fue analizada para un periodo de medición que va del 2017 hasta el 2021. La distribución de la muestra para los tres tratamientos evaluados se muestra en el cuadro 1. La tendencia de disminución en el tamaño de la muestra con el paso del año responde al efecto de mortalidad natural presente en el sitio de estudio.

**Cuadro 7.** Distribución de muestra de datos para la variable dap promedio, en tres tratamientos de densidad de siembra en franja de un Sistema Silvopastoril, Zona Norte, Costa Rica.

Tratamiento	Año					Total
	2017	2018	2019	2020	2021	
<b>2,5x1</b>	77	75	72	74	64	<b>362</b>
<b>2,5x3</b>	49	49	49	47	40	<b>234</b>
<b>2,5x6</b>	46	45	42	41	41	<b>215</b>

<b>Total General</b>	<b>310</b>	<b>306</b>	<b>298</b>	<b>303</b>	<b>271</b>	<b>811</b>
----------------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

Los análisis de varianza para la variable dap mostró que en cada año existe diferencia significativa entre los tres tratamientos evaluados, en el cuadro 2 se muestra los valores promedio de diámetro para cada tratamiento y el resultado de la prueba de comparación representado por las letras en orientación vertical.

Para cada uno de los años, 2,5x1 representa el tratamiento con menor valor de dap. Posterior al 2018 los tratamientos 2,5x3 y 2,5x6 no presentan diferencia entre ellos para el mismo año de análisis. El año 2017 es el único donde se presentan diferencias entre los tres tratamientos evaluados.

**Cuadro 8.** Valores promedio de dap en centímetros y resultado de prueba de comparación entre tres tratamientos de densidad de siembra en franjas de un Sistema Silvopastoril, Zona Norte, Costa Rica.

Tratamiento	Año				
	2017	2018	2019	2020	2021
<b>2,5x1</b>	7,69 A	10,01 A	12,39 A	13,26 A	14,64 A
<b>2,5x3</b>	11,39 C	14,20 B	17,25 B	18,56 B	20,61 B
<b>2,5x6</b>	9,55 B	13,56 B	18,41 B	20,39 B	21,75 B

#### Calidad del árbol

La variable calidad porcentual por árbol fue evaluada en un periodo que comprende desde el año 2018 hasta el año 2022, la distribución de la muestra de datos para tres tratamientos de densidad de franjas se muestran el cuadro 3.

**Cuadro 9.** Distribución de muestra de datos para la variable calidad porcentual del árbol, en tres tratamientos de densidad de siembra en franja de un Sistema Silvopastoril, Zona Norte, Costa Rica.

Tratamiento	Año				Total
	2018	2019	2020	2021	
<b>2,5x1</b>	60	66	68	59	<b>253</b>
<b>2,5x3</b>	43	42	42	38	<b>165</b>
<b>2,5x6</b>	40	33	30	30	<b>133</b>
<b>Total General</b>	<b>143</b>	<b>141</b>	<b>140</b>	<b>127</b>	<b>551</b>

El análisis de varianza para la variable porcentaje de calidad mostró significancia entre los tratamientos para cada uno de los años evaluados. En el cuadro 4 se muestra los valores promedio de calidad y el respectivo resultado de la prueba de comparación.

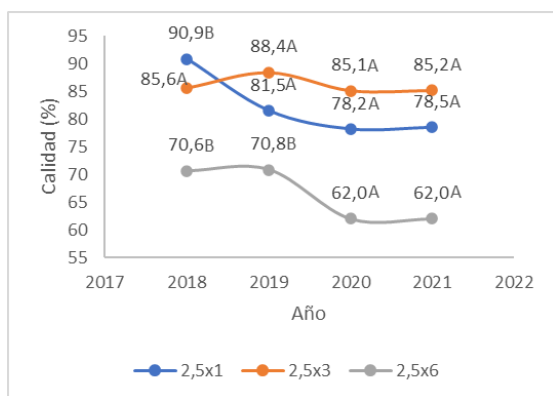
Los resultados del análisis para la variable calidad muestran que en cada año del periodo de estudio la peor calidad es correspondida para el tratamiento 2,5x6. Posterior al 2018 la

fluctuación de las diferencias para las calidades de los tratamientos 2,5x1 y 2,5x3 se estabilizan, mostrando que 2,5x3 presenta la mayor calidad

**Cuadro 10.** Valores promedio de porcentaje de calidad y resultado de prueba de comparación entre tres tratamientos de densidad de siembra en franjas de un Sistema Silvopastoril, Zona Norte, Costa Rica.

Tratamiento	Año			
	2018	2019	2020	2021
2,5x1	90,85 C	81,51 B	78,18 B	78,50 B
2,5x3	85,61 B	88,40 C	85,12 C	85,17 C
2,5x6	70,59 A	70,82 A	61,99 A	61,99 A

El análisis de varianza para el comportamiento de los tratamientos a lo largo del periodo de estudio para la variable calidad mostró únicamente significancia para los tratamientos 2,5x1 y 2,5x6. En la figura 2 se muestra el comportamiento de la variable calidad por tratamiento



**Figura 7.** Tendencia de comportamiento para calidad promedio por árbol, en tres tratamientos de densidades de siembra en franjas de un Sistema Silvopastoril, Zona Norte, Costa Rica.

### Altura comercial

La variable altura comercial fue una variable derivada de la evaluación anual por troza, el periodo de evaluación comprende desde el año 2018 hasta el año 2021; en el cuadro 5 se muestra la distribución de la muestra de datos para los tres tratamientos de densidad de franja.

**Cuadro 11.** Distribución de muestra de datos para la variable altura comercial por árbol en tres tratamientos de densidad de siembre en franjas de Sistema Silvopastoril, Zona Norte, Costa Rica.

Tratamiento	Año				Total
	2018	2019	2020	2021	
<b>2.5x1</b>	60	66	67	59	<b>252</b>
<b>2.5x3</b>	43	41	42	38	<b>164</b>
<b>2.5x6</b>	34	25	22	22	<b>103</b>
<b>Total General</b>	<b>137</b>	<b>132</b>	<b>131</b>	<b>119</b>	<b>519</b>

Los tratamientos evaluados mostraron tener diferencias significativas para cada uno de los años evaluados, en el cuadro 6 se muestra los valores de altura comercial promedio para cada tratamiento y su respectivo resultado en la prueba de comparación.

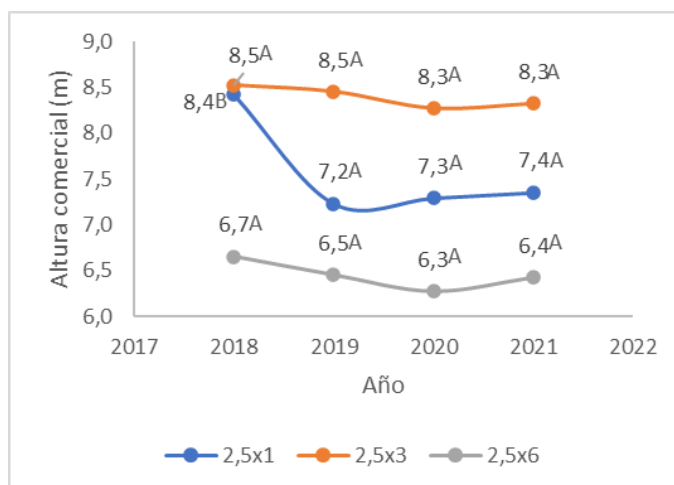
El resultado de la prueba de comparación mostró que 2,5x6 siempre representa al tratamiento de menor altura comercial sin importar el año de estudio. Por otra parte 2,5X3 logra posicionarse para el último año de estudio como el tratamiento con mayor altura comercial.

**Cuadro 12.** Valor promedio de altura comercial en metros y resultado de pruebas de comparaciones para tres tratamientos de densidad de siembra en franjas de un Sistema Silvopastoril, Zona Norte Costa Rica.

Tratamiento	Año			
	2018	2019	2020	2021
<b>2,5x1</b>	8,42 B	7,23 A	7,29 AB	7,35 AB
<b>2,5x3</b>	8,52 B	8,45 B	8,27 B	8,32 B
<b>2,5x6</b>	6,65 A	6,45 A	6,27 A	6,42 A

En la figura 3 se muestra la tendencia de comportamiento para la variable altura comercial para los tres tratamientos de densidad. En ella se puede observar que a lo largo del tiempo solamente el tratamiento 2,5x1 muestra tener una diferencia con tendencia a disminuir la altura comercial.





**Figura 8.** Tendencia de comportamiento para altura comercial promedio por árbol, en tres tratamientos de densidad de siembra en franjas de un Sistema Silvopastoril, Zona Norte, Costa Rica.

### Volumen comercial

Los resultados para la variable volumen comercial se encuentran inferidos de forma intrínseca por las variables calidad del árbol y altura comercial. Como consecuencia de esto, los resultados se muestran mejor ajustados para la toma de decisión final sobre el mejor tratamiento.

La variable volumen comercial fue evaluada dentro del periodo 2018 – 2021, la distribución de la muestra seleccionada para la determinación de diferencia de la variable volumen por tratamiento de densidad se encuentra en el cuadro 7.

**Cuadro 13.** Distribución de muestra de datos para la variable volumen comercial por árbol, en tres tratamientos de densidad de siembra en franjas de un Sistema Silvopastoril, Zona Norte, Costa Rica.

Tratamiento	Año				Total
	2018	2019	2020	2021	
<b>2.5x1</b>	59	65	67	58	<b>249</b>
<b>2.5x3</b>	42	42	33	35	<b>152</b>
<b>2.5x6</b>	39	31	30	30	<b>130</b>
<b>Total General</b>	<b>140</b>	<b>138</b>	<b>130</b>	<b>123</b>	<b>531</b>

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre los tratamientos para cada uno de los años evaluados. En el cuadro 8 se muestran los valores promedio de la variable volumen comercial y el respectivo resultado de la prueba de comparaciones múltiple.

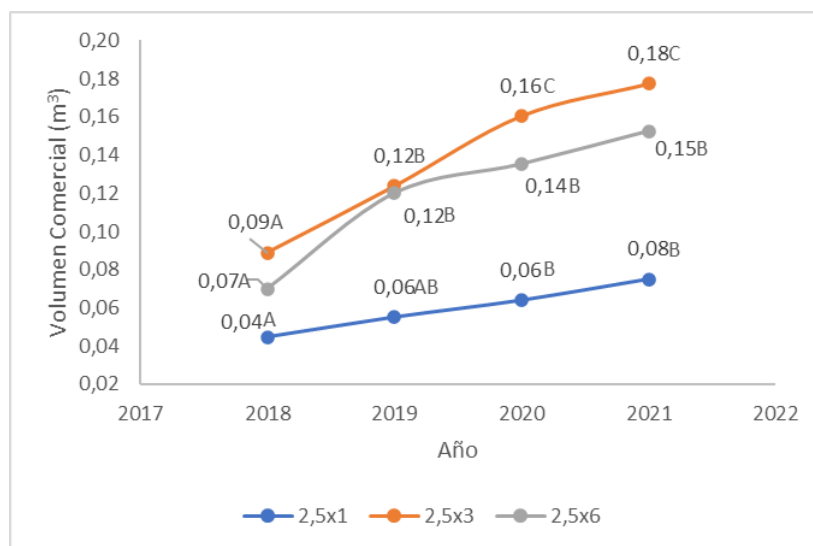
En el cuadro 8 se observa que para cada uno de los periodos evaluados existen diferencias entre los tres tratamientos de densidad. El tratamiento 2,5x1 se identifica como el de menor valor a lo largo del periodo de estudio. Posterior al 2018 los tratamientos 2,5x3 y 2,5x6 no

presentan diferencias significativas entre ellos.

**Cuadro 14.** Valor promedio de volumen comercial en metros cúbicos y pruebas de comparaciones para tres tratamientos de densidad de siembra en franjas de un Sistema Silvopastoril, Zona norte Costa Rica.

Tratamiento	Año			
	2018	2019	2020	2021
2,5x1	0,04 A	0,06 A	0,06 A	0,08 A
2,5x3	0,09 C	0,12 B	0,16 B	0,18 B
2,5x6	0,07 B	0,12 B	0,14 B	0,15 B

El análisis de tendencia del comportamiento para volumen comercial para el periodo 2018-2022 en los tratamientos de densidad se presentan en la figura 4. Se identifica la existencia de diferencias significativas en todos los tratamientos evaluados, además el año en el periodo de estudio donde se encuentran los cambios en volumen es diferente para cada tratamiento.



**Figura 9.** Tendencia de comportamiento para volumen comercial promedio por árbol, en tres tratamientos de densidad de siembra en franjas de un Sistema Silvopastoril, Zona Norte, Costa Rica.

En el cuadro 9 se presenta el resumen comparativo de los valores promedio por árbol para cada una de las variables analizadas en el estudio para el año 2021, adicional a eso se estimaron en función de los valores promedios los cálculos de número de árboles, área basal y volumen comercial para un escenario de establecimiento de 100m lineales de franja de cada tratamiento de densidad.

**Cuadro 15.** Resumen de variables para tres tratamientos densidades de siembra y proyección de valores para 100m lineales de franja en sistema silvopastoril en franjas.

Rubro	2,5x1	2,5x3	2,5x6
-------	-------	-------	-------

<b>Valores árbol</b>	<b>dap (cm)</b>	14,6	<b>20,6</b>	<b>21,8</b>
	<b>Calidad</b>	78,5	<b>85,2</b>	62,0
	<b>H (m)</b>	7,4	<b>8,3</b>	6,4
	<b>Vol<sub>com</sub></b>	0,075	<b>0,177</b>	<b>0,152</b>
<b>Valores 100m</b>	<b>N</b>	302	101	51
	<b>G (m<sup>2</sup>)</b>	5,1	3,4	1,9
	<b>Vol<sub>com</sub></b>	22,66	17,91	7,78

## Discusión

El dap por naturaleza es una variable de crecimiento continuo, por ende, el efecto de la densidad de siembra se refleja directamente en la pendiente de la tasa de crecimiento.

Al observar los resultados para el análisis de dap se evidencia como a menor densidades de siembra el valor se incrementa, tal y como pasa en otras especies, el incremento de la tasa en la variable diámetro por árbol se comporta de forma inversa a la densidad de siembra [11]. Durante el periodo de estudio se puede identificar como los tratamientos 2,5x3 y 2,5x6 se mantiene sin presentar diferencia posterior al 2017 en el análisis del dap, por lo tanto, se puede inferir que la competencia de crecimiento dentro de dichos tratamientos no es lo suficiente como para generar diferencias notables entre ellos.

Estos resultados mostrados por el comportamiento de la variable dap responde al principio de competencia por luz y efecto borde [12]. Los primeros años de crecimiento el efecto de competencia no influye en el crecimiento de la variable, la inferencia se genera al momento de crecimiento donde las copas de los árboles alcanzan la densidad suficiente para genera competencia por luz. Por lo tanto, la mayor densidad de siembra experimenta este efecto de forma temprana.

La variable calidad presenta un factor de sesgo asociado a la percepción del observador, a pesar de las descripciones en la metodología para calidad de plantaciones [9] se puede inferir dicho sesgo ya que estamos hablando de una variable cualitativa transformada a un valor categórico.

Los resultados para el análisis comparativo de la variable calidad (cuadro 4) mostraron que la densidad media (2,5X3) logra mantener un balance en la mejor calidad de los tratamientos evaluado a lo largo de periodo evaluado.

Por otra parte se infiere que las densidades de siembra bajas y altas no logran mantener su valor de calidad con el paso del tiempo, es decir en determinado año la calidad disminuye.

Al encontrarse en un sistema de franjas, la teca en densidades bajas se ve más afectada por

la incidencia del viento, de esta forma la consecuencia del descope infliere directamente sobre la disminución de la calidad de dicho tratamiento.

Para el tratamiento de densidad alta, el efecto de supresión por los árboles vecinos provoca con el paso del tiempo la disminución de la calidad en algunos de los individuos, no obstante, la incidencia del efecto por descope tiende a ser menor que el mostrado por el tratamiento de densidad baja, por ende, hablamos de una calidad relativamente aceptable.

Este comportamiento concuerda con lo visto por Alvarado [7] en el estudio para la variable calidad en plantaciones de teca, se infiere que algunas tasas de aparición de características como: bifurcaciones, ramas gruesas, número de ramas y altura de la primera rama gruesa, desfavorecen en la estimación de calidad por árbol a los tratamientos de menores densidad de siembra inicial.

El análisis de la tendencia de calidad promedio a lo largo del tiempo (figura 2) indica que densidad media no tiene diferencias con el pasar de los años, mientras que los tratamientos con densidad alta y baja presentan una disminución en los años 2019 y 2020 respectivamente; en ese caso podríamos hablar del adelantamiento de necesidades en temas silviculturales como efectos colaterales de la densidad de siembra. Las altas densidades presentan un ritmo de competencia acelerado, por lo tanto el no atender de forma adecuada las necesidades causa el decaimiento en la variable calidad.

La relación intrínseca entre la variable altura comercial y calidad se expresa de forma directa para los resultados del análisis de comparación de la variable altura comercial (cuadro 6). Se puede observar como el tratamiento de menor densidad representa al grupo de menor altura comercial, en definitiva el daño por descope infliere directamente con dicho resultado. Para los casos de mayor densidad, la altura comercial es mayor, el efecto visto en el sitio del comportamiento de las franjas se asemeja a cortinas rompevientos [4], es decir un efecto en bloque que amortiza la posibilidad de daño por el viento.

La tendencia en el tiempo de la variable altura comercial (figura 3) solamente tiene significancia para 2,5x1 en el año 2019. Es decir, para dicho año la calidad disminuye significativamente. En los tratamientos restantes el comportamiento es constante con el paso del tiempo.

Los efectos mencionados anteriormente de las variables calidad y altura comercial infirieron de forma directa sobre los resultados de comparación para la variable volumen comercial promedio por árbol (cuadro 8), el tratamiento 2,5x1 representa al peor valor de volumen comercial por árbol. En cuanto a los tratamientos 2,5x3 y 2,5x6 no se observa diferencias significativas en relación con el volumen comercial.

Es de suma importancia recalcar que en términos de mercado para la madera de teca, la variable volumen no refleja directamente el valor de ganancia. La exclusividad del mercado genera una diferenciación en precio acorde a las clases diamétricas. La inferencia de la calidad puede generar mayor peso de importancia, ya que implica mejores prestaciones sobre las ganancias finales.

La figura 4 muestra las tendencias de crecimiento a lo largo del tiempo para la variable volumen comercial por árbol, la pendiente de crecimiento de los tratamientos 2,5x3 y 2,5x6 pueden catalogarse como similares, no obstante el desplazamiento entre ambas es evidencia del efecto causado por la variable calidad.

La tendencia del volumen comercial para 2,5x1 es considerable como lineal y de baja magnitud, este efecto se genera acorde a la supresión de los individuos. La capacidad de crecimiento en volumen comercial por árbol conforme pasa los años asemeja a lo visto en otras silviculturas como el caso de plantaciones dendroenergéticas [13].

El resumen de variables mostrados en el cuadro 9 demuestra que 2,5x3 es la mejor alternativa en cuanto a balance de volumen y calidad, con similitudes a comportamientos de plantaciones tradicionales. Aunque es evidente que 2,5x1 puede generar mayor cantidad de volumen para un escenario de 100m de franja, se destaca que dicho volumen será de una calidad aceptable para volumen de tipo dendroenergético.

Por su lado contrario 2,5x6 aun teniendo la capacidad de generar una cantidad razonable de volumen comercial por árbol deja de ser competente al ser proyectada por unidad de área, de esta forma al ser proyectados en un escenario de 100m de franja se vuelve una opción poco deseable, generando la peor capacidad de producción de volumen de madera por franja debido al número de árboles, mismo efecto encontrado en estudios de comparación de densidades de siembra para plantaciones forestales [14]; este comportamiento puede ser orientado a otro tipo de actividades, ya que asemeja experiencias en el área de sistemas agroforestales.

## **Conclusiones**

La variable dap de forma generalizada presenta diferencias a lo largo del periodo de estudio, el mejor escenario llega a ser alcanzados por 2,5x3 y 2,5x6, con valores de 20,61cm y 21,75cm respectivamente a los 6 años de edad.

El mejor escenario de calidad de árbol lo tiene el tratamiento 2,5x3 con valores de promedio de 85%. Mientras que los distanciamientos 2,5x1 y 2,5x6 tienen a disminuir su valor de calidad con la edad.

La mejor altura comercial es ofrecida por el tratamiento 2,5x3, con un valor promedio por árbol de 8,4m, dicho valor se mantiene de forma constante a lo largo del tiempo.

El mejor escenario de volumen comercial por árbol lo representan los tratamientos 2,5x3 y 2,5x6 con valores de 0,18m<sup>3</sup> y 0,15m<sup>3</sup> respectivamente para 2021.

Para el escenario de 100m de franja a 2,5x3 genera un valor de volumen medio con las mejores prestaciones para producción de madera.

El escenario de 100m de franja a 2,5x1 genera el valor más alto en volumen, pero con cualidades para el mercado de biomasa, por ende se recomienda dicha densidad para otras especies.

El escenario de 100m de franja a 2,5x6 no optimiza la producción de volumen y su calidad es inferior, puede prestar otros objetivos como servicio principal, su comportamiento asemeja a diseños de sistemas agroforestales con servicios ambientales.

## Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], "Resumen ejecutivo: Resultados Generales IV Censo Nacional Agropecuario," 2014. doi: 10.18356/f4ca5e90-es.
- [2] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, "Resultados: Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM)," FAO, 2010. <https://www.fao.org/gleam/results/es/#top>.
- [3] O. Murillo, W. Paniagua, Y. Badilla, A. Rojas, J. Arce, and E. Corea, "Modelo silvopastoril orientado a la reducción de la huella de carbono y al aumento de la productividad económica." Proyecto interuniversitario CONARE, Cartago, Costa Rica, 2013.
- [4] G. Bueno, "Sistemas silvopastoriles, arreglos y usos," *Rev. Sist. Prod. Agroecol.*, vol. 3, no. 2, pp. 56–83, Dec. 2012, doi: 10.22579/22484817.604.
- [5] I. Toruño, M. Mena, and F. Guharay, *Establecimiento y manejo de Sistemas Silvopastoriles*. Catholic Relief Services, 2015.
- [6] E. Murgueitio and M. Ibrahim, "Ganadería y medio ambiente en América Latina," in *XII Congreso Venezolano de Producción e Industria Animal 2004*, 2004, p. 6.
- [7] L. Alvarado, "Efecto del espaciamiento y descope en el crecimiento y calidad de plantaciones de *Tectona grandis* en la zona sur de Costa Rica," Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2011.
- [8] O. Murillo and Y. Badilla, "Informe Final de Consultoría: Definición de una metodología de muestreo de contratos del programa de pago de servicios ambientales para la medición de la biomasa, para el desarrollo de proyectos de comercialización de créditos de carbono." FONAFIFO, San José, Costa Rica, 2015.
- [9] O. Murillo, "Metodología para la Valuación de plantaciones forestales." en Encuentro Nacional de Avalúos de Colombia, 2015.
- [10] C. Aguilar, A. Sequeira, and E. Peralta, "Factor de forma para la *Tectona grandis* L.F, empresa MLR-Forestal, Siuna, Costa Caribe Norte de Nicaragua," *Cienc. e Intercult.*, vol. 21, no. 2, pp. 74–84, 2017, doi: 10.5377/rci.v21i2.5602.
- [11] P. Ferrere, G. A. Lopez, R. T. Boca, M. A. Galetti, C. A. Esparrach, and P. S. Pathauer, "Initial density effect on *Eucalyptus globulus* growth in a Nelder modified trial," *Investig. Agrar. Sist. y Recur. For.*, vol. 14, no. 2, p. 174, 2005, doi: 10.5424/srf/2005142-00882.

- [12] L. Rodríguez, R. Lozada, A. Mora, and L. Lugo, "Efecto de borde en sistemas de enriquecimiento en fajas, Reserva Forestal Imataca, Venezuela," *Rev. For. Venez.*, vol. 55, no. 1, pp. 61–73, 2011.
- [13] A. Rodríguez, J. Cancino, E. Acuña, R. Rubilar, and F. Muñoz, "Evaluación del crecimiento de plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus globulus*, según densidad de plantación y turno de rotación en suelos contrastantes de la región del Biobío, Chile," *Cienc. Investig. For.*, vol. 19, no. 1, pp. 7–18, 2013, doi: 10.52904/0718-4646.2013.396.
- [14] P. Suatunce, G. Díaz, and L. García, "Efecto de la densidad de plantación en el crecimiento de cuatros especies forestales tropicales," *Cienc. y Tecnol.*, vol. 3, no. 1, pp. 23–26, 2010, Accessed: Nov. 24, 2022. [Online]. Available: <https://revistas.uteq.edu.ec/index.php/cyt/article/view/87/101>.

## Conclusiones generales

La producción de teca durante un ciclo completo de 16 años en este diseño SSP tiene un costo por árbol de ₡3 178 (\$5,16) para el diseño SSP 1 (máxima densidad, 125 árboles cada 100m) y ₡2 990 (\$4,82) para diseño SSP 2 (90 árboles cada 100 m).

El mejor escenario de rentabilidad para teca se obtuvo con aporte de capital propio, venta de madera internacional y aporte del PSA del Fondo Nac. de Financ. Forestal (FONAFIFO), que genera un VAN de \$21 536, una R(B/C) de 3,74 y una TIRM de 18,4%.

El diseño de SSP en desarrollo ha mostrado la posibilidad de generar una mayor productividad por área que las plantaciones convencionales, generar sombra para el ganado, permitir plantar especies amenazadas, y contribuir significativamente con la carbono neutralidad de la ganadería.

El recurso financiero que ofrece el FONAFIFO tiene como limitaciones que está disponible solamente para pequeños y medianos productores, en un único contrato y en solamente 5 millones de colones. Por tanto, se requiere de un nuevo sistema de financiamiento forestal para promover este SSP en el país.

La aprobación de la nueva norma CORFOGA-INTECO/DN 11:2022, para la producción de carne bovina en sistemas de pastoreo y libre de deforestación, podrá tener un alto estímulo al desarrollo de SSP a nivel país.

## Recomendaciones generales

El sector forestal debe buscar otra opción de financiamiento forestal. Las condiciones que

ofrece el FONAFIFO son insuficientes y no están acordes con la realidad de la ganadería del país.

Gestionar con CORFOGA la puesta en marcha de la norma DN 11:2022 “Producción de carne bovina en sistemas en pastoreo y libre de deforestación” y continuar estratégicamente estableciendo SSP en fincas líder en cada una de sus regiones geográficas.

Continuar con el fomento de los SSP focalizado en la región norte para lograr mayor adopción e impacto.

## **Agradecimientos**

A CORFOGA por todo el apoyo técnico, en la gestión de consecución de fincas líder, organización de días de campo y en la publicación del manual.

A la VIE por el apoyo económico en la realización del proyecto.

A la Dirección de Posgrado del TEC por el apoyo económico con el financiamiento de la tesis de maestría en Ciencias Forestales de Joshua Jiménez Jiménez.

## **Referencias**

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). 2015. VI Censo Nacional Agropecuario. Atlas Estadístico Agropecuario. San José, Costa Rica.

MAG, CORFOGA, INTA, CNPL, & PNUD. (2017). Manual Operativo del piloto Nacional del NAMA Ganadería. Segunda edición. [www.fb.com/namaganaderia](http://www.fb.com/namaganaderia)

Murgueitio, E., & Ibrahim, M. (2004). Ganadería y medio ambiente en América Latina. XII Congreso Venezolano de Producción e Industria Animal 2004, 6.

Murillo, O., Paniagua, W., Badilla, Y., Rojas, A., Arce, J., & Corea, E. (2013). Modelo silvopastoril orientado a la reducción de la huella de carbono y al aumento de la productividad económica.

Jiménez-Jiménez, J., Murillo, O., Badilla, Y. En prensa. “Modelo de costos por árbol para el cultivo de madera de teca (*Tectona grandis*) en sistemas silvopastoriles.” TEC Empresarial.

Murillo, O., Leitón, M., Ospino, M., Badilla, Y., Paniagua, W. and Valverde, A. “Hacia un nuevo sistema silvopastoril,” Rev. Germinar, vol. 17, no. 5, pp. 16–17, 2015.

Murillo, O.; Vallejos, Johnatan; Badilla, Yorlenny; Guzmán, Nancy; Luján, Ricardo; González, Ernesto. 2016. Crescimento efetivo mensal inicial em plantações de teca (*Tectona grandis*) em Costa Rica. Revista Nativa (Brasil) vol 4(2): 87-90.



Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2016). Síntesis – Ganadería y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Programa Mundial de Ganadería Sostenible. 13.

[http://www.livestockdialogue.org/fileadmin/templates/res\\_livestock/docs/2016/Panama/FAO-AGAL\\_synthesis\\_Panama\\_Livestock\\_and\\_SDGs\\_SP.pdf](http://www.livestockdialogue.org/fileadmin/templates/res_livestock/docs/2016/Panama/FAO-AGAL_synthesis_Panama_Livestock_and_SDGs_SP.pdf)

Ospino, M., Badilla, Y. Paniagua, W. Campos, C., Murillo, O. 2020. “Costos de producción de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en sistemas silvopastoriles de la zona norte de Costa Rica,” *Agron. Costarric.*, vol. 44, no. 2, pp. 155–173,

Ospino, M., Murillo, O., Alfaro, M. 2022. “Análisis financiero y de escenarios de financiamiento del componente forestal en sistemas silvopastoriles,” *Rev. For. Mesoam. Kurú*, vol. 19, no. 45, pp. 28–37.

Vallejos, J. 2019. El cultivo del pilón (*Hyeronima alchorneoides* Allemão) en Costa Rica. Tesis Maestría Profesional. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica 117 p.