

# Modelo experto participativo para la selección de árboles multifuncionales en potreros por medio de redes bayesianas<sup>1</sup>

Álvaro Salazar<sup>2</sup>, Cristóbal Villanueva<sup>3</sup>, Carlos R. Cerdán<sup>4</sup>, Tamara Benjamin<sup>5</sup>, David N. Barton<sup>6</sup>

## RESUMEN

Se desarrolló un 'modelo experto' para el diseño de potreros ideales mediante combinaciones de árboles en cercas vivas y árboles dispersos en potrero. La herramienta utiliza información sobre los tipos de productores y sus preferencias, conocimiento local sobre las especies arbóreas y sus beneficios, y el conocimiento de especialistas sobre los rasgos funcionales en el diseño de sistemas silvopastoriles. El modelo identifica combinaciones de especies arbóreas que permiten mejorar la provisión de servicios ecosistémicos, según objetivos de producción en finca. El modelo permite comparar resultados entre sistemas silvopastoriles que proveen los beneficios deseados.

**Palabras claves:** Adopción, sistemas silvopastoriles, rentabilidad, ganadería, servicios ecosistémicos, Rivas, Nicaragua.

## ABSTRACT

### Expert participative model for multifunctional tree selection on pastures using Bayesian networks

An expert system for the design of ideal livestock pastures using combinations of trees in live fences and pastures was developed using Bayesian networks. The tool was created with information on types of farmers and their preferences, local knowledge about tree species and their benefits, and scientific knowledge about functional traits in the design of silvopastoral systems. The model identifies combinations of multifunctional trees which improved ecosystem services provision. Also, it permits the comparison of results obtained with different silvopastoral systems that provide similar services.

**Keywords:** Adoption, silvopastoral systems, profitability, livestock, ecosystem services, Rivas, Nicaragua.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas silvopastoriles son una opción de manejo eficiente de los recursos productivos en fincas ganaderas, ya que potencialmente proporcionan beneficios sociales, económicos y ambientales. Los árboles en los potreros (dispersos y en cercas vivas) pueden proporcionar beneficios económicos y ecológicos. Entre los primeros se cuentan la producción de forraje, frutos para consumo humano y animal y productos maderables, mientras que entre los segundos están el secuestro de carbono, la conservación de la biodiversidad y del la regulación del ciclo hidrológico (Sánchez *et al.* 2004). Tales beneficios son ideales en sitios donde predominan monocultivos que afectan la biodiversidad y la resiliencia de las comunidades. Sin embargo, a pesar de los múltiples beneficios que los sistemas silvopastoriles

ofrecen, su adopción en Mesoamérica sigue siendo baja (Mercer 2004, Alonso *et al.* 2001).

Los productores agropecuarios piensan que manejar una alta cobertura de árboles es contraproducente porque la sombra afecta la productividad de los pastos al reducir la entrada de luz solar (Marie 2010). No obstante, en Costa Rica y Nicaragua se ha comprobado que los potreros tienen un rango de cobertura arbórea entre el 2 y 11,8% en promedio (Villacís 2003, Villanueva *et al.* 2004, Ruiz *et al.* 2005). Esquivel (2007) encontró que la productividad de las pasturas no se reduce en potreros con una cobertura arbórea menor a 20%. Por lo tanto, es conveniente identificar estrategias que permitan un mayor grado de adopción de sistemas silvopastoriles, de forma que

1 Basado en Salazar (2012).

2 Mag. Sc en Agroforestería Tropical, Turrialba, Costa Rica. Correo electrónico: alvarogermansalazar@gmail.com

3 Programa Ganadería y Manejo del Medio Ambiente del CATIE. cvillanu@catie.ac.cr

4 Universidad Veracruzana, México. ccerdan@uv.mx

5 Universidad de Purdue, EE.UU. tamara17@purdue.edu

6 Norwegian Institute for Nature Research (NINA). david.barton@nina.no

los productores ganaderos puedan implementar estas mejoras tecnológicas con riesgos mínimos. Para que las innovaciones tecnológicas propuestas sean adoptadas por el productor, estas deben brindar beneficios cuantitativos o cualitativos, tener un nivel de riesgo aceptable, ser compatibles con los recursos del productor y emplear especies arbóreas bien aceptadas (Somarriba 2009, Rogers 2003).

Para el desarrollo de esta metodología se propone una herramienta tecnológica basada en las redes bayesianas (RB). Las RB son un conjunto de nodos acíclicos dirigidos mediante flechas que reflejan una relación causal. La relación expresada por las flechas entre un nodo y otro está representada mediante probabilidades condicionales (Horvitz *et al.* 1988). Las RB han sido utilizadas para modelar sistemas expertos en campos como la medicina para la sistematización del conocimiento médico y el diagnóstico de enfermedades (Lucas *et al.* 2000, Papaconstantinou *et al.* 1998). De forma creciente, se ha venido usando en el manejo ambiental y de recursos naturales (Barton *et al.* 2012). En el campo de la agroforestería se han hecho incursiones con trabajos como el Joshi *et al.* (2001) y Villanueva *et al.* (2003), los cuales identificaron, mediante redes bayesianas y con información de productores, los factores determinantes de la tala y el aprovechamiento forestal. En estos trabajos la RB permitió una evaluación deductiva de probabilidades de adopción de prácticas mejoradas según condiciones de la finca y del productor.

Nuestro propósito con este estudio es demostrar cómo la funcionalidad diagnóstica o inductiva de las RB puede ser usada para identificar la mejor combinación de árboles (con mayor potencial de adopción y con mejor calidad en provisión de servicios ecosistémicos), a partir de los servicios ecosistémicos deseados y las características del productor y su finca. El estudio se llevó a cabo en el departamento de Rivas, Nicaragua. La zona tiene una temperatura promedio anual (entre los años 1971-2000) de 26,1°C y 1519 mm de precipitación promedio anual (Ineter 2012); con altitudes que van de 100 a 200 msnm y dos tipos de suelos: vertisoles y molisoles (Sánchez *et al.* 2004).

Para construir el modelo experto se recolectó información primaria mediante entrevistas semiestructuradas a 55 productores. Mediante un ejercicio con maqueta que representaba el potrero actual y típico del productor, se fue modificando hasta identificar el potrero ideal, en la visión del productor. Las entrevistas semiestructuradas se hicieron con dos objetivos: identificar las características socioeconómicas de los productores para diferenciar los objetivos en la finca de acuerdo al tipo de productor,

o identificar las especies arbóreas con mayor potencial de adopción tecnológica. En la Figura 1 se ofrece un ejemplo de ejercicio con maqueta, que parte de la situación actual del potrero hasta llegar al estado ideal en términos de abundancia y composición.

### **Diseño de un modelo experto para el análisis de la información**

Para diseñar el modelo experto se utilizó el programa Hugin Expert. La estructura básica del modelo experto se presenta en la Figura 2. Este modelo permite identificar el potrero ideal de un productor teniendo en cuenta los siguientes aspectos: 1) el tipo o tipos de servicio ecosistémicos que el productor desee potencializar en su finca; 2) el tipo o tipos de rasgos funcionales deseados por el productor o sugeridos por un especialista; 3) la cantidad de ingresos financieros que el productor desee obtener con la combinación de especies arbóreas (EA); 4) el tamaño de copa promedio de los árboles (grande, mediana, pequeña); 5) la densidad de árboles que el productor desee en su finca o en los potreros y 6) el tipo de especie leñosa deseada en el potrero ideal. La herramienta ofrece diversas cualidades para el diseño de potreros con árboles multifuncionales. Esto se debe a que la RB permite hacer análisis inductivos o deductivo/diagnóstico. Esto significa que se puede identificar la composición y abundancia de las EA mediante el uso de múltiples restricciones de forma simultánea.

Debido al gran número de nodos, la complejidad del modelo obligó a buscar funcionalidad y sencillez para su interpretación. Para esto se creó una red superficial con los nodos más importantes para un extensionista o asistente técnico, y se dejó de lado, en subredes, la información no necesaria para el análisis, como las operaciones aritméticas que permiten determinar la rentabilidad de las EA (Figura 3).

La red causal Figura 4 sistematiza información de características de un potrero ideal de un productor teniendo en cuenta los beneficios actuales vs futuros. Los nodos color verde oscuro y amarillo hacen referencia a información primaria de la presente investigación, los nodos color rojo a conocimiento especializado, los nodos color azul a información financiera, nodos color verde fosforescente a información de conocimiento local. En la sección de resultados se continuará explicando el funcionamiento de la RB. Los beneficios actuales corresponden a los ingresos que el productor percibe en el actual sistema ideal, mientras que futuros a los ingresos adicionales que el productor esperaría obtener con los cambios esperados.

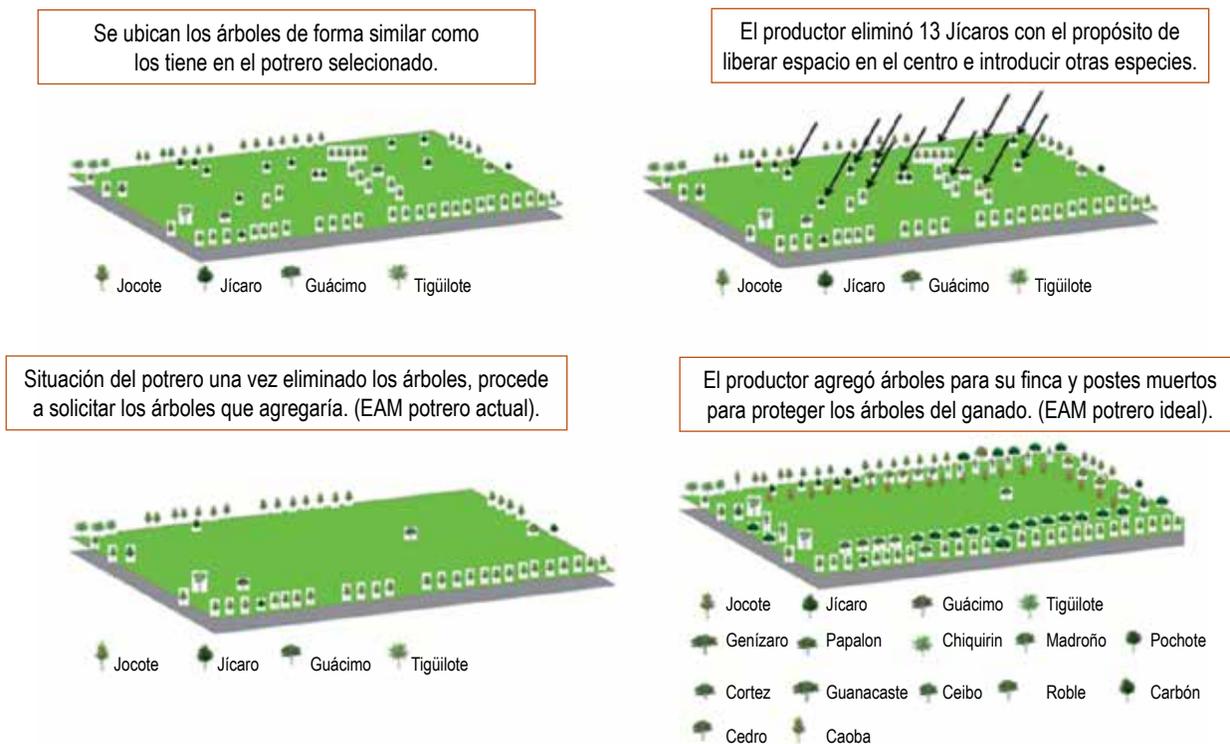


Figura 1. Ejemplo visual de un estudio de caso con maqueta (Salazar 2012).

**Rasgos/atributos funcionales y servicios ecosistémicos**

A partir de las bases de datos del proyecto FunciTree, se recopiló información sobre seis servicios ecosistémicos de interés (leña, sombra, nutrición animal, control de erosión y mejoramiento de suelos, resistencia a sequía, protección fuentes de agua) (Mosquera 2010). De las 27 especies arbóreas incluidas en la base de datos, se seleccionaron las más importantes para un potrero ideal, en opinión de los productores de Rivas, Nicaragua. La subred bayesiana que se configuró (Figura 5) se adjuntó al modelo principal. Esa subred está conformada por los siguientes nodos:

a) **Rasgos funcionales (conocimiento local):** este nodo incluye la información que resulta de la composición y abundancia del potrero ideal (nodo “especies arbóreas potrero ideal” de la (Figura 4). La información de frecuencias que alimenta este nodo proviene del número de veces que fue mencionado un rasgo/ atributo funcional asociado a una EA entre las seleccionadas. Cuando no se encontró información para algunas EA<sup>7</sup>, se registró información homogénea de tal forma que no afecte los estados condicionales en otros nodos.

7 No se encontró información de las especies siguientes: *Simarouba amara*, *Swietenia humilis*, *Cedrela odorata*, *Bursera simarouba*, *Cordia alliodora*, *Byrsonima crassifolia*, *Pachira quinata*.

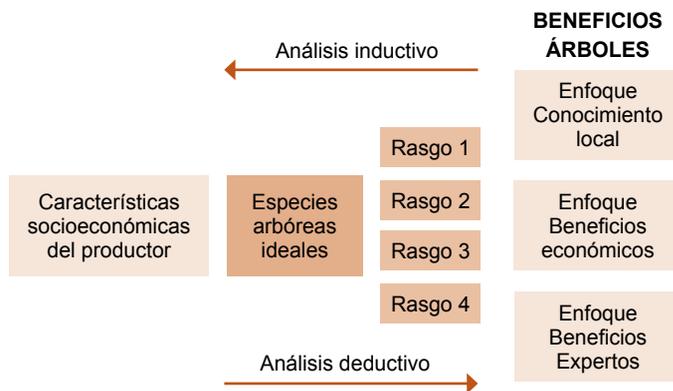


Figura 2. Diagrama estructural de una red causal ideal para análisis de la información

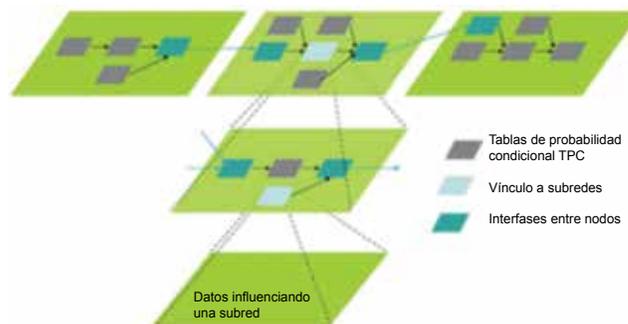


Figura 3. Redes bayesianas orientadas a objetos

Traducido de Barton *et al.* (2008).



- b) **Rasgos o atributos funcionales desde la perspectiva de los expertos:** para este nodo se registró la existencia o no existencia, mediante variables dicotómicas (1 o 0), de la relación entre conceptos de rasgos/ atributos funcionales, conocimiento local y rasgos funcionales terminología de experto. Este enlace busca homogeneizar el lenguaje científico con el del conocimiento local. Prácticamente los resultados de este nodo son los mismos del nodo rasgos funcionales (conocimiento local), pero con terminología de expertos en ecología funcional. Cuando no se encontró una asociación clara se puso el número 1 para no afectar la condicionalidad.
- c) **Servicios ecosistémicos (conocimiento local):** este nodo registra información de la base de datos de Mosquera (2010); se tomó en cuenta el número de veces que los productores mencionaron un rasgo/ atributo funcional de una EA como proveedora de un servicio ecosistémico.
- d) **Servicios ecosistémicos (conocimiento experto):** se entrevistó a ocho especialistas en ecología para identificar la relación (positiva) entre rasgos/atributos funcionales y servicios ecosistémicos. Es decir, las características que tiene una EA que la capacitan para la prestación de un servicio ecosistémico. El objetivo es realizar una alineación entre EA en potrero ideal, rasgos/atributos funcionales, conocimiento local y conocimiento experto sobre servicios ecosistémicos. Se incluyó también información relacionada con “antiservicios” de las especies arbóreas según la información de Mosquera (2010) (Figura 6). Esta subred se adjuntó al modelo experto principal.

#### Subred de limitaciones, motivaciones y soluciones

De la encuesta a productores se obtuvo información sobre las limitaciones, motivaciones y soluciones que encuentra el productor para adoptar el sistema en conjunto, no sólo a nivel de potrero sino a nivel de finca. La Figura 7 se adjuntó a la red principal modelo experto.

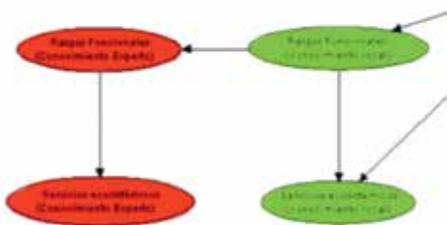


Figura 5. Subred bayesiana de conocimiento local y experto

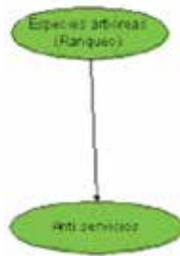


Figura 6. Subred de antiservicios de las especies arbóreas

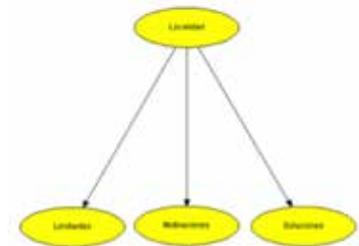


Figura 7. Subred de limitantes, motivaciones y soluciones de la adopción

#### Subred de ingresos y costos financieros (potrero actual vs. ideal)

A partir de las cuatro subredes incluidas en el modelo integral experto, se diseñó una subred de costos e ingresos (Figura 8). Para la adición de nuevos árboles se agregó un nodo adicional que cuantifica los costos totales de implementación del sistema en cercas vivas y árboles dispersos en potrero.

A continuación una explicación breve de los nodos:

- a) **Ingresos brutos (US\$/árbol):** contiene información de ingresos brutos unitarios mínimos y máximos, a términos constantes del 2011 para las especies arbóreas de las cuales se obtuvo información financiera.
- b) **Costos de manejo (US\$/árbol):** contiene información sobre mínimos y máximos de costos de manejo a precios constantes del 2011 para las especies arbóreas de las cuáles se obtuvo información financiera.
- c) **Ingresos netos de manejo (US\$/árbol):** determina mediante cálculos probabilísticos los ingresos netos unitarios por árbol durante el periodo de proyección. El nodo realiza la operación de resta entre la información del nodo ingresos brutos y costos de manejo.
- d) **Área promedio de la copa (m<sup>2</sup>):** contiene información de bases de datos del proyecto Silpas sobre diámetros de copa por especie arbórea, a partir de 1821 árboles de 21 especies arbóreas.
- e) **Especies arbóreas adicionales de árboles dispersos en potreros:** determina el número de árboles que deben incluirse en el potrero, según un porcentaje de cobertura ideal. Este nodo contiene la siguiente ecuación:  $\text{Árboles/ha} = (\% \text{ cobertura ideal} * 10.000 \text{ m}^2) / (\text{Área copa (m}^2))$ . La fórmula es la misma para las otras tres subredes del modelo; únicamente cambian los valores de la fuente.
- f) **Cobertura arbórea (%):** determina el nivel de cobertura del potrero ideal programado. Dentro del nodo se usó la siguiente fórmula para determinar el porcentaje de cobertura:  $\text{nodo especies arbóreas} * \text{Área}$

de la copa ( $m^2/\text{árbol}$ )/10000\*100. Esta fórmula se aplicó a las cuatro subredes.

- g) **Ingresos netos totales de manejo** (US\$/árbol año): contiene información sobre ingresos totales de las especies arbóreas en potrero a términos constantes del 2011 para las especies arbóreas de las cuales se obtuvo información financiera. El nodo realiza la operación restando la información contenida del nodo ingresos netos de manejo y los multiplica con la información del nodo (árboles #/ha) para las especies arbóreas de las que se tiene información. Las operaciones que se realicen en este nodo estarán condicionadas a la información origen de distribución de especies arbóreas, cobertura ideal de copas, área de la copa y otros nodos que puedan ser manipulados por el usuario en la red integrada; tal es el caso de los servicios ecosistémicos.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Funcionamiento de la red bayesiana

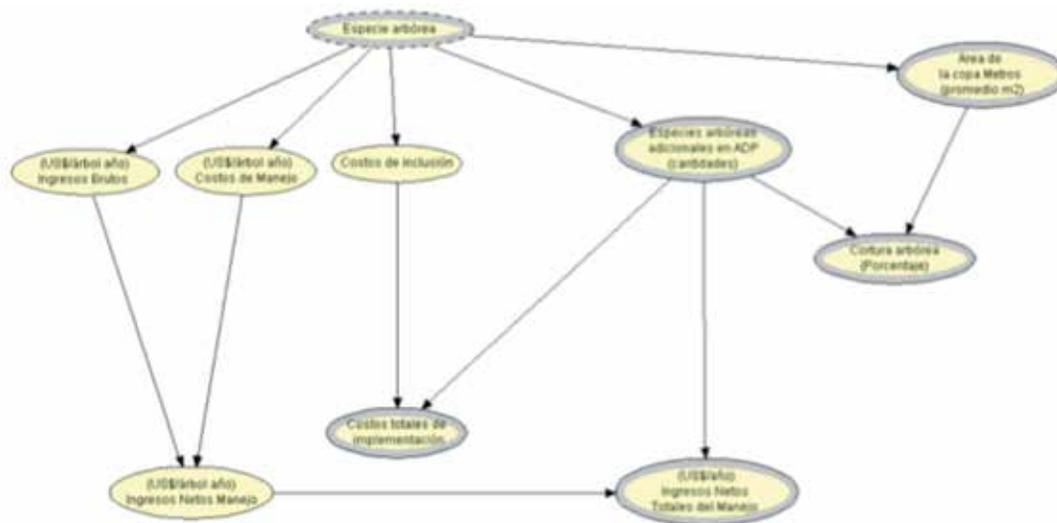
Para explicar el funcionamiento de la red bayesiana (modelo experto), en la Figura 4 se detalla un estudio de caso para un productor tipo extensivo. La dinámica de la red consistió en definir características de un potrero ideal para un productor pequeño tipo subsistencia. En el potrero ideal se define el porcentaje de cobertura arbórea probable para 1 hectárea a partir del promedio de copa estimado de la composición de árboles seleccionada por el productor, el número de árboles, los ingresos netos a obtener con los árboles a los 25 años y los costos totales de implementación del sistema, cuando se trata de adicionar árboles al potrero.

La RB también proporciona información sobre los rasgos/atributos funcionales más probables para la composición de árboles adicionales como árboles dispersos en potreros (ADP) o en cercas vivas (CV). También se evalúan los servicios ecosistémicos que estos proporcionan desde la perspectiva del conocimiento local y desde la perspectiva de especialistas en ecología. Además, para el tipo de productor específico, se determinan las motivaciones que les impulsan a establecer el potrero visualizado en conjunto, así como las limitaciones y posibles soluciones.

En el caso que se ilustra, el productor seleccionó un potrero con un 48% de cobertura arbórea total. Su decisión fue incrementar la cobertura arbórea en CV, principalmente; así pasó de 12 árboles a 35 árboles. Los ingresos potenciales con los árboles en potrero, que en un inicio serían de US\$1175, subieron a US\$2728 con los árboles adicionales en el potrero ideal.

Los productores consideran que los árboles adicionales les aportan múltiples beneficios, tales como sombra para los animales, mejoramiento de los suelos, provisión de leña, protección de fuentes de agua y, en menor proporción, nutrición animal y resistencia a la sequía. Los especialistas, por su parte, afirman que este sistema proporciona las mejores características para el mejoramiento de los suelos.

El desarrollo de metodologías de este tipo debe ofrecer beneficios reales a la sociedad (Varis y Kuikka 1997). El



**Figura 8.** Ejemplo de una red causal de costos e ingresos financieros de los árboles en potrero actual e ideal.

modelo experto propuesto puede ser útil como herramienta para recomendar combinaciones de árboles ‘en tiempo real’, en una situación de discusión entre productor, extensionista o asistente técnico. También es posible hacer recomendaciones sobre reforestación en sistemas silvopastoriles que busquen optimizar el uso de los recursos y la adopción de tecnologías en amplias zonas en el área de estudio.

### **Potreros ideales por tipo de productor y servicios ecosistémicos deseados**

En el Cuadro 1 se presentan las características de los potreros ideales por tipo de productor y servicio ecosistémico. Se encontró que los productores prefieren incrementar la cobertura arbórea en CV antes que en ADP; asimismo, prefieren incorporar árboles de fácil prendimiento que reporten beneficios económicos, y eliminar aquellos de poca utilidad o que afecten la productividad de las pasturas debido al exceso de sombra. Estas preferencias concuerdan con estudios como el de Irshad *et al.* (2011) y Salam *et al.* (2000), quienes afirman que las motivaciones que inciden en la adopción de especies arbóreas tienen que ver con factores culturales y socioeconómicos; es decir que los productores prefieren plantar árboles que reporten beneficios ecológicos que ellos perciben directamente, como la fertilidad de los suelos (Cerdán *et al.* 2012). Entre los beneficios más buscados están asegurar alimento para los animales en verano, diversificar los bienes y productos de la finca (estacas, madera, leña), mejorar la belleza escénica del entorno.

Por lo general, los productores han ido trabajando hacia el potrero ideal a lo largo de los años; sin embargo, existen una serie de dificultades que les impiden desarrollarlo en toda su finca; entre ellas, falta de mano de obra, capital y tiempo. Los productores suelen tener un presupuesto limitado por lo que necesitan una cierta certidumbre de que la tecnología ofrecida les reportará los beneficios esperados (Alonso *et al.* 2001). Para el productor, las prioridades están en las actividades de rendimiento a corto plazo. Comparado con la inversión agrícola, los retornos que pueden proporcionar los árboles demoran más tiempo; por ejemplo, para obtener algún tipo de beneficio con *Gliricidia sepium*, los productores deben esperar como mínimo dos años (Thangata y Alavalapati 2003, Alonso *et al.* 2001). Generalmente los pequeños productores tienden a hacer un uso muy racional de sus recursos escasos, por lo que prefieren ir a lo seguro y lo tradicional antes que probar tecnologías nuevas y complicadas con beneficios inciertos.

La cobertura arbórea en potrero actual ronda el 15% y cuando se llega al potrero ideal es de aproximadamente el 42%. En promedio, un productor tiene en CV 12 árboles y adiciona 36 árboles en el potrero ideal. En ADP hay, en promedio, siete árboles y se agregan 18 árboles más en el potrero ideal. Estos datos son similares a los encontrados por Sánchez *et al.* (2004) en la misma zona: en promedio, las fincas tienen 0,7 km de cerca viva y 16,2 árboles por hectárea de potrero. Según Esquivel (2007), a partir de un nivel de cobertura del 30%, la productividad de las pasturas empieza a declinar. El modelo experto busca, entonces, identificar opciones silvopastoriles que no superen el nivel de cobertura arbórea a partir del cual se empieza a reducir la productividad del sistema productivo.

En CV potrero actual, las EA más comunes son *Cordia dentata*, *Gliricida sepium* y *Spondias purpurea*. En el proceso de mejoramiento, los productores agregan *Pachira quinata* en gran proporción. En ADP, las EA más comunes en potrero actual son *Guazuma ulmifolia* y *Cordia alliodora* y para el potrero ideal se consideran *G. sepium*, *P. quinata*, *C. dentata*.

En promedio, con el potrero actual en un ciclo de 25 años, un productor obtiene ingresos por venta de productos derivados de los árboles por un monto de US\$1347; con el potrero ideal se tendrían ingresos adicionales en promedio de US\$2249, con una inversión de US\$28 dólares para establecer dicho sistema.

El estado más probable de nivel de cobertura para los potreros ideales de los productores se encuentra en un rango del 40% y 45% y en el potrero actual entre 13 y 16%. Un productor promedio de Rivas podría aumentar su cobertura arbórea en un 10% sin tener mayores efectos negativos en la productividad de la pastura y obtener ingresos por US\$1270 por hectárea por los árboles adicionales. Los productores tipo subsistencia reportaron los mayores ingresos por la adición de árboles en potrero ideal (US\$2810) y los productores tipo intensivo los que menos ingresos reportaron (US\$1924) (Cuadro 1).

### **Implicaciones del tamaño de la copa del árbol en la adopción**

El tamaño de la copa es un factor de importancia al momento de considerar un mayor o menor número de árboles en el potrero. Por ejemplo, especies como *Enterolobium cyclocarpum* y *Albizia saman*, que si bien son buenas proveedoras de fruta para los animales, no

son aceptadas por los productores debido a su amplia copa. Los productores no aceptan a las especies de copa grande porque afectan la productividad de las pasturas. Ningún productor escogió potreros ideales con este tipo de árboles en las pasturas, aunque si se combinan con otros árboles de copa menos amplias funcionan bien para la prestación de sombra a los animales. A pesar de sus reservas en relación con las especies, casi ningún productor aceptó eliminar los árboles de *E. cyclocarpum* y *A. saman* en su potrero actual.

Las especies mejor aceptadas para el potrero ideal fueron las de copa estrecha, como *C. dentata*, *G. sepium*, *P. quinata*. No obstante, especies con un tamaño de copa superior al promedio representan el 20% de la cantidad

de árboles en potrero ideal; entre ellas, *Cassia grandis* (255 m<sup>2</sup>), *A. saman* (175 m<sup>2</sup>), *E. cyclocarpum* (130 m<sup>2</sup>), *P. quinata* (122 m<sup>2</sup>), *Leucaena* sp (102 m<sup>2</sup>), *G. ulmifolia* (75 m<sup>2</sup>).

A pesar de su copa relativamente amplia, *P. quinata* es la tercera EA más importante en potreros de la zona. Los productores consideran que esta especie, además de ser de fácil prendimiento, se desarrolla de forma rápida y tiene una alta demanda comercial en la zona. La especie se usa como postes maestros que se ubican cada 25 metros lineales en la cerca viva para templar el alambre y dar soporte a la cerca. Los productores manifestaron interés por proteger la especie pues ha ido desapareciendo de los potreros debido a lo valioso de su madera; además es un árbol de gran belleza escénica.

**Cuadro 1.** Características de potreros ideales por tipo de productor y tipo de servicio ecosistémico

|                               | Características potrero ideal por tipo de productor          |                |                   | Características potrero ideal por tipo de productor y tipo de servicio ecosistémico |        |           |       |                      |                            |                        |  |
|-------------------------------|--|----------------|-------------------|---|--------|-----------|-------|----------------------|----------------------------|------------------------|--|
|                               | Beneficios de las especies arbóreas en potrero ideal         | Potrero actual | Potrero adicional | Potrero ideal   | Sombra | Nutrición | Leña  | Resistencia a sequía | Protección fuentes de agua | Mejoramiento de suelos |  |
| <b>Productor extensivo</b>    | <b>Árboles (Cerca viva)</b>                                  |                |                   |   |        |           |       |                      |                            |                        |  |
|                               | Número de árboles  | 13             | 37                | 50  | 45     | 51        | 53    | 44                   | 45                         | 54                     |  |
|                               | Cobertura arbórea  | 8              | 20                | 28  | 26     | 29        | 29    | 26                   | 26                         | 30                     |  |
|                               | Costos de implementación US\$                                |                | 32                | 32  | 29     | 33        | 34    | 28                   | 28                         | 35                     |  |
|                               | Ingresos netos US\$  | 935            | 1.171             | 2.106   | 2.497  | 2.065     | 1.866 | 2.345                | 2.457                      | 2.067                  |  |
| <b>Productor intensivo</b>    | <b>Árboles (árboles dispersos en el potrero)</b>             |                |                   |   |        |           |       |                      |                            |                        |  |
|                               | Número de árboles  | 7              | 11                | 19  | 18     | 18        | 21    | 20                   | 18                         | 18                     |  |
|                               | Cobertura arbórea  | 7              | 8                 | 15  | 15     | 15        | 15    | 16                   | 15                         | 15                     |  |
|                               | Costos de implementación US\$                                |                | 18                | 18  | 17     | 17        | 20    | 20                   | 17                         | 17                     |  |
|                               | Ingresos netos US\$  | 627            | 844               | 1.471   | 1.440  | 1.436     | 1.494 | 1.484                | 1.508                      | 1.479                  |  |
| <b>Productor intensivo</b>    | <b>Árboles adicionales potrero ideal (Cerca viva)</b>        |                |                   |   |        |           |       |                      |                            |                        |  |
|                               | Número de árboles  | 10             | 35                | 45  | 42     | 42        | 51    | 40                   | 41                         | 48                     |  |
|                               | Cobertura arbórea  | 7              | 19                | 26  | 24     | 26        | 30    | 25                   | 24                         | 27                     |  |
|                               | Costos de implementación                                     |                | 31                | 31  | 28     | 29        | 35    | 27                   | 27                         | 33                     |  |
|                               | Ingresos netos   | 661            | 1.334             | 1.995   | 2.326  | 1.874     | 1.621 | 1.957                | 2.293                      | 2.041                  |  |
| <b>Productor intensivo</b>    | <b>Árboles adicionales potrero ideal (árboles dispersos)</b> |                |                   |   |        |           |       |                      |                            |                        |  |
|                               | Número de árboles  | 7              | 9                 | 16  | 15     | 16        | 17    | 15                   | 15                         | 16                     |  |
|                               | Cobertura arbórea  | 7              | 9                 | 16  | 16     | 16        | 16    | 16                   | 16                         | 16                     |  |
|                               | Costos de implementación                                     |                | 16                | 16  | 15     | 16        | 16    | 15                   | 15                         | 16                     |  |
|                               | Ingresos netos   | 663            | 590               | 1.253   | 1.438  | 1.289     | 1.092 | 1.449                | 1.445                      | 1.167                  |  |
| <b>Productor subsistencia</b> | <b>Árboles adicionales potrero ideal (Cerca viva)</b>        |                |                   |   |        |           |       |                      |                            |                        |  |
|                               | Número de árboles  | 12             | 36                | 48  | 48     | 47        | 51    | 45                   | 47                         | 49                     |  |
|                               | Cobertura arbórea  | 9              | 19                | 27  | 27     | 29        | 31    | 28                   | 27                         | 27                     |  |
|                               | Costos de implementación                                     |                | 31                | 31  | 31     | 30        | 33    | 29                   | 31                         | 32                     |  |
|                               | Ingresos netos   | 567            | 1.996             | 2.563   | 2.749  | 2.437     | 2.078 | 2.408                | 2.721                      | 2.620                  |  |
| <b>Productor subsistencia</b> | <b>Árboles adicionales potrero ideal (árboles dispersos)</b> |                |                   |   |        |           |       |                      |                            |                        |  |
|                               | Número de árboles  | 8              | 11                | 19  | 19     | 19        | 21    | 21                   | 19                         | 19                     |  |
|                               | Cobertura arbórea  | 7              | 8                 | 15  | 14     | 15        | 15    | 15                   | 14                         | 14                     |  |
|                               | Costos de implementación                                     |                | 18                | 18  | 17     | 18        | 20    | 19                   | 17                         | 17                     |  |
|                               | Ingresos netos   | 590            | 814               | 1.404   | 1.428  | 1.352     | 1.335 | 1.479                | 1.442                      | 1.387                  |  |

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo experto basado en redes bayesianas permite determinar los beneficios actuales de un sistema silvopastoril (árboles dispersos en potrero, cercas vivas y linderos), diseñar alternativas óptimas para los productores y generar bienes y servicios ecosistémicos prioritarios.

Los potreros que aprovechan especies arbóreas multifuncionales en servicios como sombra para animales

y protección a fuentes de agua reportaron mejores ingresos para los tres tipos de productores considerados. Para mejorar los beneficios y obtener altos niveles de adopción se sugiere promover la tecnología a partir de portafolios multifuncionales de árboles con cualidades específicas para sombra y protección de fuentes de agua, teniendo en cuenta las condiciones y necesidades de la zona de estudio. Se sugiere profundizar en métodos y estudios que valoricen los beneficios directos e indirectos de los árboles.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, M; Ibrahim, M; Gómez, M; Prins, K. 2001. Potencial y limitaciones para la adopción de sistemas silvopastoriles para la producción de leche en Cayo Belice. *Agroforestería en las Américas* 8(30): 24-27.
- Barton, D; Kuikka, O; Varis, L; Uusitalo, H; Henriksen, M; Borsuk, A; de la Hera, R; Farmani, S; Johnson, J; Linnell, D. 2012. Bayesian networks in environmental and resource management. *Integr Environ Assess Manag.* 8(3): 418-29.
- Barton, D; Saloranta, T; Moe, S; Eggstad, H; Kuikka, S. 2008. Bayesian belief networks as a meta-modelling tool in integrated river basin management -- Pros and cons in evaluating nutrient abatement decisions under uncertainty in a Norwegian river basin. *Ecological Economics* 66(1):91-104.
- Cerdán, CR; Rebolledo, MC; Soto, G; Rapidel, B; Sinclair, F. 2012. Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems* (110):119-130.
- Esquivel, H; Ibrahim, M; Harvey, C; Benjamin, T; Sinclair, F. 2007. Impacts of dispersed trees in pastures on fodder quantity and quality to cattle in seasonally dry ecosystems. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 100 p.
- Horvitz, E; Breese; Henrion, M. 1988. Decision theory in expert systems and artificial intelligence. *Journal of Approximate Reasoning (Special Issue on Uncertain Reasoning)* 2:247-302
- Ineter (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales). 2012. Meteorología, normas históricas. Managua. <http://www.ineter.gob.ni/>
- Irshad, M; Khan, A; Inoue, M; Ashraf, M; Sher, H. 2011. Identifying factors affecting agroforestry system in Swat, Pakistan. *African Journal of Agricultural Research* 6(11): 2588-2591.
- Joshi, L; Wibawa, G; Sinclair, F. 2001. Local ecological knowledge and socio-economic factors influencing farmers' management decisions in jungle rubber agroforestry systems in Jambi, Indonesia. Bangor, UK, University of Wales, School of Agricultural and Forest Sciences. 33p.
- Lucas, P; Bruijn, N; Schurink, K; Hoepelman, A. 2000. A probabilistic and decision-theoretic approach to the management of infectious disease at the ICU. *Artificial Intelligence* 19(251): 279.
- Marie, C. 2010. Of trees and pastures – management of woody resources and the social dynamics in La Chocolata, Rivas, Nicaragua. Montpellier, France, CIRAD. 328 p.
- Mercer, DE. 2004. Adoption of agroforestry innovations in the Tropics: A review. *Agroforestry Systems* (61):311-328.
- Mosquera Andrade, D. 2010. Conocimiento local sobre bienes y servicios de especies arbóreas y arbustivas en sistemas de producción ganadera de Rivas, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 115 p.
- Papaconstantinou, C; Theocharous, G; Mahadevan, S. 1998. An expert system for assigning patients into clinical trials based on Bayesian networks. *J. Medical System* 3: 189:202.
- Rogers, EM. 2003. Diffusion of innovation. 5 ed. New York, Free Press. p. 219-266.
- Ruiz, F; Gómez, R; Harvey, C. 2005. Caracterización del componente arbóreo en los sistemas ganaderos de Matiguás, Nicaragua. Managua, Nicaragua, Tropitécnica – Nitlapan. 40 p.
- Sánchez, F; López, M; Medina, A; Gómez, R; Harvey, C; Vílchez, S; Hernández, B; López, F; Joya, M; Sinclair, F; Kunth, S. 2004. Importancia ecológica y socioeconómica de la cobertura arbórea en un paisaje fragmentado de bosque seco de Belén, Rivas, Nicaragua. *Revista Encuentro(NI)* no. 68: 14 p. Managua, Nicaragua, Universidad Centroamericana.
- Salam, M; Noguchi, T; Koike, M. 2000. Understanding why farmers plant trees in the homestead agroforestry in Bangladesh. *Agroforestry Systems* (50): 77-93.
- Salazar, A. 2012. Modelo experto para el análisis de la adopción de árboles en pasturas del trópico seco de Nicaragua. Tesis Mg.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 101 p.
- Somarriba, E. 2009. Planificación agroforestal de fincas. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Materiales de enseñanza N° 49. 100 p.
- Thangata, P; Alavalapati, J. 2003. Agroforestry adoption in Southern Malawi: the case of mixed intercropping of *Gliricidia sepium* and maize. *Agroforestry Systems* (78): 57-71.
- Varis, O; Kuikka, S. 1997. Joint use of multiple environmental assessment models by a Bayesian meta-model: the Baltic salmon case. *Ecol. Model* (102):341–351.
- Villacís, J. 2003. Relaciones entre la cobertura arbórea y el nivel de intensificación de las fincas ganaderas en Río Frío, Costa Rica. Tesis Mg.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 129 p.
- Villanueva, C; Ibrahim, M; Harvey, C; Sinclair, F; Gómez, R; López, M; Esquivel, H. 2004. Tree resources on pastureland in cattle production systems in the dry pacific region of Costa Rica and Nicaragua. In Mannetje, L; Ramírez, L; Ibrahim, M; Sandoval, C; Ojeda, N; Ku, J. eds. The importance of silvo-pastoral systems for providing ecosystems services and rural livelihoods. Mérida, MX. p. 183-188.
- Villanueva, C; Muhammad, I; Harvey, C; Fergus, L; Sinclair; Muñoz, D. 2003. Decisiones claves que influyen sobre la cobertura arbórea en fincas ganaderas de Cañas, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 10(39-40): 69-77.