



Título: Un modelo experto participativo para la selección de árboles multifuncionales en potreros (usando redes bayesianas)

Autor: Álvaro Salazar, David N. Barton, Carlos Cerdán, Tamara Benjamin, Cristóbal Villanueva.

Palabras clave: Adopción, sistemas silvopastoriles, rentabilidad, ganadería, servicios ecosistémicos, redes bayesianas.

Keywords: Adoption, silvopastoral systems, profitability, livestock, ecosystem services, Bayesian networks.

RESUMEN

Se desarrolló un modelo ‘experto’ para el diseño de potreros ideales en función de la multifuncionalidad de combinaciones de árboles en cercas vivas y dispersos en potrero. El modelo identifica combinaciones de especies arbóreas (EA) con múltiples funciones que potencializan servicios ecosistémicos según objetivos de producción en finca de los productores. La herramienta utiliza información sobre las preferencias y características de los productores, el conocimiento que ellos tienen sobre las EA, sus beneficios, y el conocimiento de especialistas sobre la importancia que cumplen los rasgos funcionales en el diseño de los sistemas silvopastoriles. El análisis indica que un productor tipo intensivo que desea potencializar especies arbóreas para leña y nutrición animal podría obtener ingresos hasta por 1184 US\$ a 25 años.

SUMMARY

We developed an expert system for the design of an ideal livestock pastures for livestock farmers in terms of the multifunctionality of combinations of trees in live fences and in pasture. The system identifies combinations of multifunctional trees which potentialise priority ecosystem services for the farmer. The tool is created with farmer’s preference and characteristics, their local knowledge about tree species and specialist knowledge about the importance of functional traits in the design of silvopastoral systems. The analysis indicates that if a farmer wants potentiate intensive tree species for firewood and animal nutrition could be earning up to US\$ 1184 at 25 years.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una opción de manejo eficiente de los recursos productivos para los productores ganaderos. Los árboles dispersos en los potreros y las cercas vivas son SSP tradicionales en Centroamérica (Ibrahim *et al.* 2007). Los árboles en los potreros (árboles dispersos y cercas vivas) pueden proporcionar beneficios económicos y ecológicos – en los primeros sombra para el ganado, forraje, frutos para consumo humano y animal, y productos maderables; mientras en la parte ecológica contribuyen con el secuestro de carbono, conservación de la biodiversidad y en el ciclo hidrológico (Sanchez *et al.* 2004). A pesar de los conocidos beneficios (sociales, económicos y ambientales) que se desprenden de la adopción de estas mejoras tecnológicas especialmente en la época seca donde escasea el alimento para los animales (Muñoz *et al.* 2003), los productores enfrentan cierto nivel de riesgo e incertidumbre al adoptarlas (Mercer 2004, Alonzo *et al.* 2001). Los productores tienen la concepción de que manejar una cobertura alta de árboles es contraproducente porque la sombra que ofrecen estos afecta la productividad de las pasturas al impedir la entrada de los rayos del sol (Marie 2010). Esquivel

(2007) encontró que la productividad de las pasturas en términos de biomasa no tiene efectos negativos a un nivel de cobertura arbórea inferior al <20%. En Costa Rica y Nicaragua se ha identificado que los potreros tienen un rango de cobertura arbórea entre el 2 y 11,8% (Ruiz *et al.* 2005, Villanueva *et al.* 2004, Villacís 2003).

Es por tanto propicio identificar nuevas formas que permitan el desarrollo de los SSP para que productores ganaderos puedan implementar estas mejoras tecnológicas minimizando los riesgos que ellos enfrentan en la adopción. Para que las innovaciones propuestas por la ciencia sean desarrolladas por el productor, estas deben tener un beneficio reconocido cuantitativo y cualitativo, un nivel de riesgo aceptable, compatible con los recursos del productor, y estar acorde con los gustos y aversiones en este caso en cuanto el tipo de especie arbórea (Somarriba 2009, Rogers 2003).

Para el desarrollo de esta metodología se propone una herramienta tecnológica basada en redes bayesianas (RB). Las RB son un conjunto de nodos o grafos a cíclicos dirigidos mediante flechas que reflejan una relación causal. La relación expresada por las flechas dirigidas 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 sistematizar el conocimiento médico y poder inferir diagnósticos de enfermedades (Lucas 2000, Papaconstantinou *et al.* 1997) y de forma creciente en el campo de manejo ambiental y de recursos naturales (Barton *et al.* 2012). En el campo de la agroforestería han incursionado con trabajos como el Joshi *et al.* (2001) y Villanueva *et al.* (2003) donde se identificaron mediante redes bayesianas y con información de productores los determinantes de la tala y el aprovechamiento forestal respectivamente. En estos trabajos la RB se usa para evaluación deductiva de probabilidad de adopción de prácticas mejoradas dado condiciones de la finca y del productor. En la aplicación presente, demostramos 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) dado una especificación de servicios ecosistémicos deseados, y las características del productor y su finca.

METODOLOGIA

El estudio se llevó a cabo en el departamento de Rivas en Nicaragua. Cuenta con una temperatura promedio anual (entre los años 1971-2000) de 26,1 °C y la precipitación promedio anual es de 1519 mm (INETER, 2000). La elevación se encuentra entre los 100 a 200 metros sobre el nivel del mar y se identifican dos tipos de suelos, vertisoles y molisoles (Sánchez *et al.* 2004) (Figura 1).



Figura 1. Paisaje de las pasturas de Rivas Nicaragua en verano.

Para construir el modelo experto se tomo información de diversas fuentes. Se recolecto información primaria mediante entrevistas semi-estructuradas a 55 productores que mediante el ejercicio con una maqueta que representaba el potrero actual y típico del productor, se fue modificando hasta identificar el potrero ideal del productor ampliado a nivel de finca. Esta entrevista se hizo con dos objetivos: 1) para identificar las características socioeconómicas de los productores para diferenciar objetivos en finca por tipo de productor, 2) identificar las especies arbóreas con mayor potencial de adopción.

Se recolectó de la misma forma información financiera de las especies arbóreas con mayor potencial de adopción mediante encuestas a ocho productores con conocimientos específicos en cuanto a costos de inclusión y aprovechamiento de árboles para leña, madera, frutas de consumo humano todo valorado a precios de mercado. Se recopiló información de bases de datos del proyecto FUNCiTree de las EA identificadas con mayor potencial de adopción. Esta base de datos fue un ranqueo realizado por Mosquera (2010) donde se calificó las EA de acuerdo a la capacidad de proporcionar al productor el mayor número de beneficios¹ acumulados y la de proporcionar mejor calidad de servicios ecosistémicos² de importancia en la región con base en el análisis de las características o rasgos funcionales más importantes para tipo de servicio ecosistémico. Se recopiló información primaria del proyecto FRAGMENT sobre el tamaño de la copa de las EA seleccionadas anteriormente. Finalmente se entrevistó a ocho especialistas en el tema de ecología para identificar la relación (positiva) que ellos encuentran entre rasgos funcionales/ atributos y servicios ecosistémicos.

Para el análisis de la información se diseño un modelo financiero (en hojas de cálculo) a 25 años sin tener en cuenta la devaluación del dinero en el tiempo para las EA identificadas y los productos que se pudo obtener información a precios de mercado.

Para diseñar el modelo experto se escogió el programa Hugin Expert especializado en redes bayesianas para la creación de un modelo experto. La estructura básica del modelo experto se presenta en la Figura 2. El modelo experto está en capacidad de identificar combinaciones de EAM en sistemas silvopastoriles teniendo en cuenta los siguientes aspectos: 1) el tipo o tipos de servicio ecosistémicos que desee potencializar el productor en la finca, 2) por tipo o tipos de rasgos funcionales deseados por el productor o sugerido por especialista, 3) por la cantidad de ingresos financieros que el productor desee obtener de las combinaciones de EA, 4) Por el tamaño de copa promedio de los árboles (grande, mediana, pequeña), 5) por la densidad de árboles que desee el productor en su finca o en los potreros, 6) por tipo de especie leñosa deseadas en el potrero ideal. La herramienta presenta diversas cualidades que la hacen propicia para el diseño de potrero con árboles multifuncionales. Esto se debe a que la RB permite hacer

¹ Sombra para animales, sombra para pasturas, leña, madera para construcción y muebles, control de erosión y mejoramiento de suelos, protección fuentes de agua, medicinal, frutas a los seres humanos.

² Nutrición animal, control de erosión y mejoramiento de suelos, sombra para animales y pastos, leña, resistencia a sequías y protección a fuentes de agua).

análisis inductivo o deductivo/diagnóstico. Esto significa que se pueden identificar la composición y abundancia de las EA mediante el uso de múltiples restricciones simultáneamente.

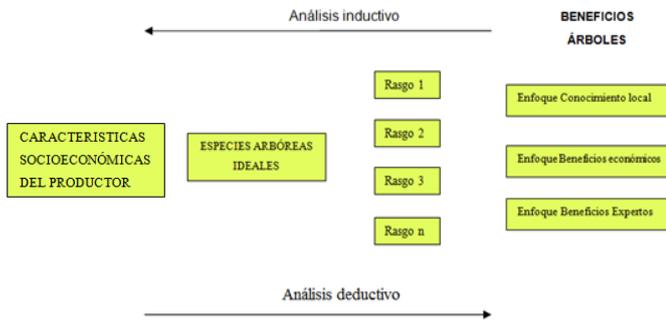


Figura 2. Diagrama estructural de una red causal ideal para análisis de la información.

La complejidad del modelo debido al gran número de nodos obligó a buscar funcionalidad y sencillez en la interpretación del modelo. Para esto se creó una red superficial con los nodos más importantes pensando en el uso que le puede ser útil a un extensionista y dejando en subredes la información no necesaria de análisis como lo son las operaciones aritméticas para determinar rentabilidad de las EA (Figura 3). El desarrollo metodológico para la construcción paso a paso del modelo experto fue elaborado en el estudio de Salazar (2012)

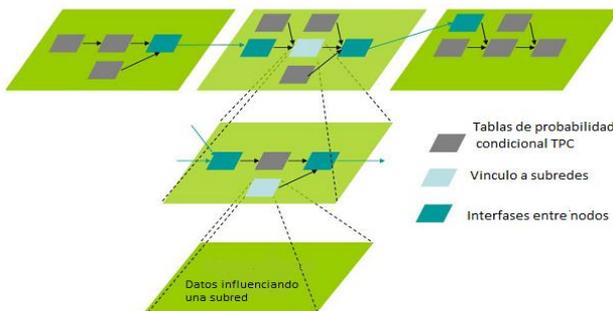


Figura 3. Redes Bayesianas Orientadas a Objetos. Tomado de Barton et al. (2008), Modificado al Español.

RESULTADOS Y DISCUSION

El funcionamiento del modelo se explica de forma más didáctica con un estudio de caso hipotético a modo de ejemplo. Usando el modelo de forma diagnóstica en el campo el productor especificaría cuales servicios ecosistémicos quisiera promover en un potrero mejorado, tomando en cuenta sus características. Para el caso de la Figura 4 el productor se enfoca a la ganadería de forma empresarial o intensiva, en donde el tamaño de finca es de 20 a 50 hectáreas, que usa principalmente mano de obra familiar, enfocado productivamente a la ganadería con aproximadamente entre 10 y 20 cabezas de ganado, teniendo en cuenta que la cobertura arbórea deseada es del 20%. Para estas características identificadas se desea identificar la recomendación de los árboles a escoger para que este productor potencialice los servicios ecosistémicos de leña y nutrición animal.

Para este productor el modelo recomienda la inclusión de árboles como *Gliricidia sepium*, *Leucaena* sp., *Diphys arobinoides* en mayor proporción. Teniendo en cuenta que el productor desease adoptar un total de 32 árboles por hectárea los costos asociados a la inclusión es de alrededor de 34 US\$. El promedio de área de la copa de la combinación de estas EA es de 78 m² y se percibirían ingresos estimados promedio a 25 años de 1184 US\$ sin tener en cuenta el valor del dinero en el tiempo. Esta combinación de EA además presta otros beneficios al productor como: 1) madera para construcción y muebles, 2) cercas vivas para reproducir el sistema y la elaboración de postes maestros para fortalecer las cercas con EA como *Gliricidia sepium*, 3) mejoramiento de suelos y sombra para animales con EA como *Guazuma ulmifolia* que presenta una de las sombras más benéficas que no afectan las pasturas (Mosquera 2010). De acuerdo al conocimiento de los especialistas esta combinación de EA es muy benéfica por el valor nutritivo de la hoja, poseer un contenido nutritivo alto, por tener buenas características como flamabilidad para combustión, ser palatable al gusto de los animales entre otras.

El desarrollo de metodologías debe ser medido por la capacidad de ofrecer beneficios reales a la sociedad (Varis y Kuikka 1997). El principal beneficio del modelo experto propuesto es su uso como herramienta para recomendar combinaciones de árboles 'en tiempo real' en una situación de discusión entre productor y extensionista.

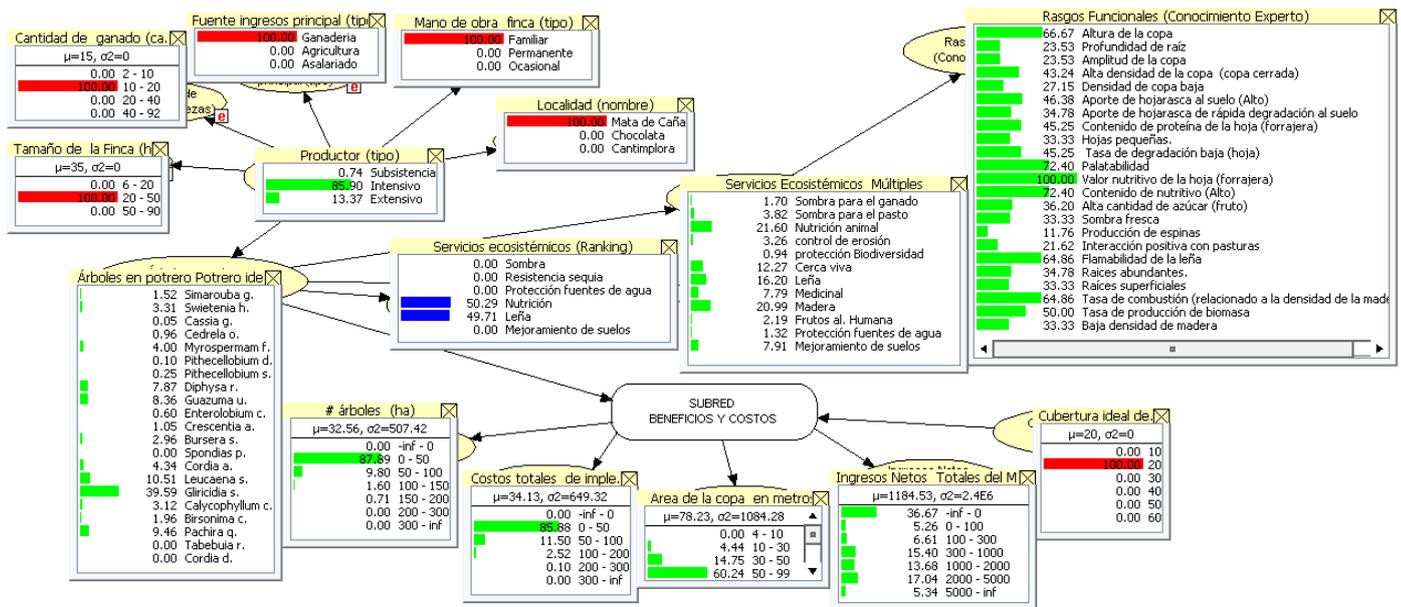


Figura 2. Un diseño aleatorio de un potrero ideal para un productor que potencializa nutrición animal y leña.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La red bayesiana diseñada tiene múltiples beneficios teniendo en cuenta que se pueden hacer análisis de forma deductiva (escenarios) o inductiva (diagnósticos) y de forma instantánea. La cantidad de combinaciones que la red puede ser explorada es aún indeterminada. Es una importante herramienta que está en proceso de ser probada su aplicación en Nicaragua y se espera que la metodología tenga un amplio potencial de ser usada y mejorada para su aplicación en otras regiones. Una vía de investigación es tomar en cuenta la motivación del productor con incentivos económicos como por ejemplo pagos por servicios ambientales, tomando en cuenta el cambio de productividad que resulta del incremento de la densidad de árboles en potrero. De esta forma se podría diseñar estrategias rurales para incentivar a productores en tiempo real con pleno conocimiento de la información en el diseño de planes de reforestación de paisajes multifuncionales con un elemento agregado de compensación al productor rural.

BIBLIOGRAFIA

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.

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. *Department of Agriculture and Agroforestry, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).* 100p.

Horvitz, E; Breese; Henrion, M. 1988. Decision Theory in Expert Systems and Artificial Intelligence. *Journal of Approximate Reasoning, Special Issue on Uncertain Reasoning. International Journal of Approximate Reasoning.* 50p.

Ibrahim, M; Villanueva, C; Casasola, F. 2007. Sistemas silvopastoriles como una herramienta para el mejoramiento de la productividad y rehabilitación ecológica de paisajes ganaderos en Centro América. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal* 15: 74-88.

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. *School of Agricultural and Forest Sciences University of Wales, Bangor.* 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* (3)251:279.

Madsen, A; Jensen, F; Kjærulff, U; Lang, M. 2005. The Hugin tool for probabilistic graphical models. *Int J Artif Intell Tools.* 14 (3) 507:543.



- Marie, C. (2010) Of trees and pastures – management of woody resources and the social dynamics in La Chicolata, Rivas Nicaragua. CIRAD. 328p
- Muñoz, D; Harvey, C; Sinclair, F; Mora, J; Ibrahim M. 2003. Conocimiento local de la cobertura arbórea en sistemas de producción ganadera en dos localidades de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 10(39-40): 1-68p.
- Papaconstantinou, C; Theocharous, G; Mahadevan, S. 1998. An expert system for assigning patients into clinical trials based on Bayesian networks. *J. Medical System* 22(3)189:202.
- Rogers, EM. 2003. *Diffusion of Innovation*. 5 ed., Free Press, New York. p. 219-266
- Ruiz, F; Gómez, R; Harvey, C. 2005. Caracterización del componente arbóreo en los sistemas ganaderos de Matiguás, Nicaragua. TROPITECNICA – NITLAPAN. 40 p.
- Sabido, W. 2001. Mag. Sc. Thesis. CATIE. Turrialba, CR. 105p.
- Sanchez, F; López, M; Medina, A; Gómez, R; Harvey, C; Vilchez, 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. *Encuentro*. p. 7-20.
- Salazar, A. 2012. Análisis (ex ante) de la adopción de árboles en el trópico seco de Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. (en preparación). 111p.
- Somarriba. 2009. Planificación agroforestal de Fincas. *Materiales de enseñanza N° 49*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 100p.
- Villacís J. 2003. Relaciones entre la cobertura arbórea y el nivel de intensificación de las fincas ganaderas en Rio Frio, Costa Rica. MSthesis, CATIE, Turrialba, Costa Rica, CATIE. 129p.
- 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. The importance of Silvopastoral 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.