

Avances de Investigación

Conectividad funcional para los géneros de aves *Trogon*, *Icterus* y *Dendroica* en el paisaje de la subcuenca del río Copán, Honduras¹

A. Sanfiorenzo², F. DeClerck³, T. Benjamin³, S. Velásquez³

RESUMEN

En Centroamérica la ganadería extensiva e intensiva es una de las actividades más impactantes, la cual fue identificada como una de las principales causas de la deforestación y de la pérdida de biodiversidad en esta región. Ante este escenario es necesario identificar mecanismos para reducir los impactos negativos de los sistemas de producción ganaderos. Este trabajo tuvo como objetivos la elaboración de modelos de calidad de hábitat y conectividad funcional para los géneros de aves *Dendroica*, *Trogon* e *Icterus*, y evaluar la contribución actual de los sistemas silvopastoriles (SSP) a la provisión de hábitat y conectividad. Además, se modeló la incorporación de una franja de bosques riparios de 30 m o la adición de SSP de baja densidad en pendientes entre 0-15%, sistemas silvopastoriles de alta densidad en pendientes entre 16-40%, bosques en zonas de pendientes mayores al 40% y la combinación de ambos modelos. La subcuenca del río Copán es un paisaje altamente fragmentado que mantiene una baja proporción (25%) de bosques naturales. El paisaje provee una mayor calidad de hábitat para los géneros *Icterus* y *Dendroica* que para el *Trogon*, que es dependiente de las áreas naturales, las cuales están dispersas en parches estructuralmente desconectados dentro del paisaje. Los sistemas agrosilvopastoriles, en especial los de alta densidad, son usos del suelo importantes representados en las redes de conectividad para los tres géneros evaluados. Al introducir una franja de bosques ribereños de 30 m, SSP y bosques, bajo distintas pendientes se aumenta la cantidad de hábitat y la conectividad funcional a través del paisaje, beneficiando a los organismos dependientes de bosques como los del género *Trogon*. Los SSP tienen un rol importante, sirviendo de hábitats para los organismos más tolerantes a la perturbación como los géneros *Icterus* y *Dendroica*. En el caso de especies dependientes del bosque, los SSP favorecen la conectividad funcional entre los parches de hábitats existentes. Las iniciativas de conservación dentro del paisaje deben incluir estrategias que busquen modificar la matriz productiva como por ejemplo, la incorporación de SSP en combinación con otras alternativas que permitan conservar y expandir las áreas naturales dentro de este paisaje fragmentado.

Palabras claves: conectividad funcional, ecología de paisaje, fragmentación, ecoagricultura, bosque ribereño

ABSTRACT

Cattle production has been identified as one of the principal causes of deforestation and biodiversity loss in Central America. Therefore it is increasingly necessary to identify mechanisms that reduce the negative impacts of cattle production systems on biodiversity. The objective of this project was to develop habitat quality and landscape connectivity models for three genera of avifauna, *Trogon*, *Icterus* and *Dendroica* by evaluating the contribution of current land use, particularly silvopastoral systems to habitat provisioning and landscape connectivity. We also model how landscape connectivity and conservation values change with three interventions: 1) 30 meters riparian forest protection, 2) the inclusion of low density silvopastoral systems on slopes between 0-15%, high density silvopastoral systems on slopes between 16-40% and restored forest on slopes > 40%, 3) the combination of model one and two. The Copan watershed is a highly fragmented landscape with less than 25% original forest remaining. Present habitat quality for *Icterus* and *Dendroica* is much greater than that for *Trogon* which is much more dependant on forest habitats and whose habitat is highly dispersed in small patches throughout the landscape. Silvopastoral systems, particularly pastures with high tree density, are identified as land uses that contribute to maintaining and increasing connectivity of landscape networks for the three evaluated genera in the region. Our modeling demonstrates the significant contributions of silvopastoral systems and riparian forests in creating habitat and maintaining connectivity. Silvopastoral systems play an important role in providing habitat and functional connectivity in the Copan watershed landscape. More tolerant genera such as *Icterus* and *Dendroica* are capable of using these systems as habitat; less tolerant genera sharing the dispersal and habitat preferences of *Trogon* may use these systems as corridors to move throughout the landscape, but will find them unsuitable as habitat. Landscape management initiatives should include strategies that promote more environmentally friendly production systems as silvopastoral systems, combined with strategies that conserve and expand the natural areas within a landscape particularly for less mobile species. Species specific landscape models serve as an important tool for making landscape scale management decisions, and for conservation planning in agricultural landscapes.

Keywords: functional connectivity, landscape ecology, fragmentation, ecoagriculture, riparian forest

¹ Basado en Contribución de diferentes arreglos silvopastoriles a la conservación de labiodiversidad, mediante la provisión de hábitat y conectividad en el paisaje de la sub-cuenca del Río Copán, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.

² M.Sc. en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad, CATIE, Turrialba, Costa Rica. Correo electrónico: asanfior@catie.ac.cr

³ Profesores-investigadores, CATIE, Turrialba, Costa Rica. Correos electrónicos: fdeclerck@catie.ac.cr; tamara@catie.ac.cr; svelasqu@catie.ac.cr

INTRODUCCIÓN

La conservación de áreas naturales y el fomento de la conectividad entre estas surgió como una alternativa para lograr la conservación de la biodiversidad en muchas regiones. Las acciones que incluyen la protección de áreas como reservas y corredores, así como la modificación de la matriz productiva en el paisaje, deben ser integradas a planes de conservación (Laurance 2004). La implementación de prácticas productivas más sustentables como los SSP, con el fin de conservar la biodiversidad pueden contribuir a las estrategias regionales de conservación (McNeely y Scherr 2002).

En paisajes agrícolas tropicales los SSP, en los cuales se conservan árboles de regeneración natural o especies plantadas, influyen en procesos ecológicos y características como la presencia y la dispersión de flora y fauna, el microclima, la dinámica de plagas, el ciclaje de nutrientes y la disponibilidad de agua (Schroth *et al.* 2004).

Adicionalmente, estos SSP pueden contribuir a la conservación de la biodiversidad mediante el aumento en la conectividad para las poblaciones y los procesos ecológicos dentro de los paisajes fragmentados. Los árboles en pasturas aumentan la variedad vegetal y estructural en el paisaje agrícola. Además, pueden contribuir a la biodiversidad de animales al proveer fuentes importantes de alimento y hábitat (Harvey *et al.* 2006).

El concepto de conectividad es muy amplio, pero en general implica conexión de hábitats, especies, comunidades y procesos ecológicos a múltiples escalas espaciales y temporales (Noss 1991). Este concepto es usado para describir cómo el arreglo espacial y la calidad de los elementos en el paisaje afectan el movimiento de organismos entre parches de hábitats. A una escala de campo, la conectividad puede ser definida como el grado en el que el paisaje facilita o impide el movimiento entre parches de recursos (Taylor *et al.* 1993). Las especies animales perciben el paisaje de formas diferentes y varían según su nivel de tolerancia a la perturbación y a los cambios del hábitat, esto influye en cómo aprecian la integridad del paisaje y el nivel de conectividad presente (Bennett 2004).

Los géneros de aves *Trogon*, *Icterus* y *Dendroica* fueron seleccionados con los objetivos de modelar la disponibilidad de hábitat y la conectividad dentro del paisaje. Estas aves fueron seleccionadas porque representan un gradiente en su grado de dependencia a hábitats

no perturbados. Además, son parte del grupo de aves identificados en otros estudios donde se mide la riqueza y abundancia de estas en distintos usos del suelo a lo largo de Centroamérica (Estrada *et al.* 1997, Vélchez *et al.* 2003, Santivañez 2005, Ramírez 2006). La conectividad funcional y estructural en paisajes ya deforestados es de suma importancia para la conservación por su contribución para sostener poblaciones viables dentro del paisaje. Esto presenta una necesidad de estudiar cómo diferentes arreglos silvopastoriles y su ubicación en el paisaje pueden contribuir a la provisión de hábitat y conectividad. Con este estudio, se pretende generar un modelo de predicción de hábitat para los géneros *Trogon*, *Icterus* y *Dendroica*; diseñar una red de conectividad funcional para los géneros *Trogon*, *Icterus* y *Dendroica* y modelar la inclusión de SSP en los sistemas ganaderos tradicionales para identificar cambios en las métricas de paisaje y la disponibilidad de hábitat y conectividad presentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El área de estudio comprende en su totalidad la subcuenca del río Copán con un área de 598 km², esta a su vez forma parte de la cuenca del río Motagua. Los municipios de Copán Ruinas, Santa Rita, Cabañas, San Jerónimo, Concepción, San Agustín, Paraíso y la Unión se encuentran en su totalidad o parcialmente dentro de la cuenca y son parte del departamento de Copán, Honduras.

Este departamento está ubicado entre las coordenadas 14°43'-14°58' latitud norte y 88°53'-89°14' longitud oeste. La topografía de la subcuenca es irregular, presentando pendientes menores a 30% en su mayoría, sin embargo, existen áreas con pendientes entre 30 y 45%. Los rangos altitudinales oscilan entre 600 y 1.700 msnm. La precipitación en la subcuenca muestra rangos entre los 1.375 y los 1.760 mm/año. El promedio anual es de 1.600 mm. Las temperaturas mínimas y máximas promedian entre los 19 °C y los 29 °C.

Como base se utilizaron mapas de usos del suelo elaborados a una escala de 1:5.000, de acuerdo con una imagen Ikonos 2007 (Sanfiorenzo 2008). Los remanentes de bosques dentro de la subcuenca alcanzan en su totalidad un 25%, colocando a este paisaje dentro del rango de paisaje fragmentado, establecido por McIntyre y Hobbs (1999). Estos autores señalan que en este tipo de paisaje la conectividad y otros procesos ecológicos están siendo afectados por el alto grado de fragmentación presente.

Mediante la utilización de sistemas de información geográfica se generaron mapas de calidad de hábitat para los géneros *Trogon*, *Icterus* y *Dendroica*. Además, se identificó la red de conectividad funcional presente en la subcuenca del río Copán para estos géneros. También, se modeló la inclusión de SSP en las fincas ganaderas con manejos tradicionales, según los rangos de pendientes, y en una franja de bosques ribereños de 50 m en los cauces de agua del paisaje, con el fin de identificar cambios en las métricas de paisaje, la disponibilidad de hábitat y la conectividad para los géneros evaluados.

Hábitat funcional

Los análisis de calidad de hábitat fueron realizados utilizando la extensión FunConn para ArcGis v9.1. Para esta se debe generar un índice de calidad del hábitat para los diferentes usos del suelo. Este debe ser en valores de cero a 100 y es definido por el usuario del programa (Theobald 2006). Para lograr esto se describieron los hábitats reportados por Stiles y Skutch (2007) y Howell y Webb (1995) para todas las especies de los tres géneros analizados e identificados como presentes en el paisaje por investigaciones locales (Gallardo 2007). Con base en la descripción de hábitat dada por los autores, se clasificaron las especies como afines o no a los usos del suelo presentes en la subcuenca (Sanfiorenzo 2008). El número de especies en cada hábitat se sumó y se transformó a porcentajes, siendo éste el valor para la calidad del hábitat a ser utilizado en la modelación. Además, se seleccionaron como funcionales los parches de hábitat que tengan la capacidad de sostener al menos 2/3 de las especies que componen el género, es decir, parches de bosque con un valor mayor a 66% en el índice de calidad de hábitat. Este umbral asegura que todas las especies dentro de un mismo género perciban como hábitat funcional los parches seleccionados.

Adicional al parámetro de calidad de hábitat, se utilizó el rango de forrajeo para las especies como criterio para la selección de parches funcionales. El rango de forrajeo se calculó con base en el peso corporal (Theobald y Hobbs 1999) y luego seleccionando el más bajo para asegurar que todas las especies dentro del género puedan alcanzar los parches escogidos como funcionales. Si bien es cierto que son muchas las variables que influyen en el rango de forrajeo de un organismo, existe una fuerte relación (75-90% de la variación interespecífica), entre el peso corporal y el área de forrajeo (Harestad y Bunnell 1979). El uso de estas ecuaciones alométricas resulta muy útil para el análisis a escalas de paisaje, pues

permiten utilizar las características y el comportamiento de los organismos de interés en las modelaciones de calidad y conectividad del hábitat dentro de un paisaje. Con este parámetro fue posible seleccionar los parches que están dentro del rango de forrajeo aunque no cumplan con el tamaño mínimo de parche.

Para este trabajo, el tamaño mínimo de parche fue de 1 ha por ser ésta la unidad mínima posible en FunConn para el análisis. El rango de forrajeo se obtuvo utilizando ecuaciones alométricas propuestas por Theobald y Hobbs (1999) y se utilizó la siguiente ecuación: $I = 1,166M^{1,06}$, donde M es la masa del individuo en kg y I es el área de forrajeo en km². A partir de este dato, con la siguiente ecuación obtenemos el radio de forrajeo $R_f = (I/3,1415)^{1/2}$. Se definió el rango de forrajeo más bajo de todas las especies pertenecientes al género como la distancia que puede ser recorrida a través de cualquier uso durante sus actividades diarias. Los valores de M se obtuvieron de los datos de peso corporal provistos por Skutch (1989) y Howell y Webb (1995).

Conectividad funcional

Los análisis de conectividad fueron realizados utilizando la extensión FunConn para ArcGis v9.1. Para esta se debe generar un valor de permeabilidad del hábitat en los diferentes usos del suelo (Theobald 2006) y para asignar los valores de permeabilidad del hábitat se emplearon las bases de datos de estudios sobre el valor de conservación de los SSP, realizados en paisajes tropicales de Mesoamérica (Estrada *et al.* 1997, Vélchez *et al.* 2003, Santivañez 2005, Ramirez 2006). Los estudios usados para obtener los valores de permeabilidad fueron diseñados con el fin de describir la abundancia y la riqueza de especies en diferentes usos del suelo de paisajes agropecuarios en distintas regiones mesoamericanas, los cuales en su mayoría están presentes en el paisaje de la subcuenca del río Copán, incluyendo pasturas sin árboles y pasturas de baja y alta densidad arbórea. Los valores de permeabilidad son requeridos por FunConn en una escala entre cero y uno, donde uno representa usos del suelo con mayor permeabilidad y cero representa usos de suelos no permeables para los organismos modelados (Theobald 2006).

La metodología para conseguir estos valores fue similar a la utilizada para obtener la calidad del hábitat, enumerando las especies reportadas como presentes en los diferentes usos del suelo en la subcuenca. El número de especies en cada hábitat se sumó y se transformó

a porcentajes, siendo este el valor para el índice de permeabilidad del hábitat a ser utilizado en la modelación. No todas las especies presentes reportadas en la subcuenca fueron contenidas en los estudios empleados para desarrollar la permeabilidad. Sin embargo, los valores de permeabilidad se realizaron con la intención de describir el comportamiento del género más que el de especies individuales. Considerando esto, es posible lograr unos valores que reflejen el comportamiento del género con las especies presentes en los demás estudios. No todos los estudios usados para generar los valores de permeabilidad evaluaron la regeneración natural dentro de sus tratamientos. Por tal motivo, se decidió, en el caso de los tres géneros evaluados utilizar el inverso del valor de fricción (0,2), desarrollado por el proyecto FRAGMENT (Useche 2006), como valor de permeabilidad (0,8) para este uso del suelo (Cuadro 1).

La herramienta FunConn para ArcGIS v9,1 está basada en la teoría de gráfica y ofrece mayores alternativas al tradicional modelo de la ruta de menor resistencia (Theobald 2006). Además, se utilizó la herramienta Build Landscape Network que crea una red representando conectividad entre parches de hábitat, lo cual se logra empleando parches de hábitats funcionales como fuente, datos sobre cobertura del suelo y la resistencia al desplazamiento que presenta el género analizado. La red se compone de nodos, parches y conectores.

Modelación

Luego de realizar la red de conectividad en el paisaje se procedió a generar tres escenarios de cambio en el paisaje. Estos escenarios fueron: 1) la incorporación de una franja de bosque ribereño de 50 m a cada lado de los cauces de agua como establece la nueva ley forestal de Honduras (2007); 2) los sistemas ganaderos convencionales son simulados como sistemas agrosilvopastoriles de baja densidad en pendientes entre un 0 y un 15%, sistemas agrosilvopastoriles de alta densidad en pendientes entre un 16 y 40% y bosques en las zonas con pendientes mayores a un 40%; y 3) la combinación de los escenarios uno y dos, lo cual se logró mediante técnicas de reclasificación en ArcGIS v9,1.

Después, se observó y describió cómo cambian las métricas del paisaje, tales como cantidad y calidad de hábitat, y la conectividad estructural y funcional en el paisaje según los diferentes escenarios evaluados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hábitat funcional

En total fueron 12 especies del género *Dendroica*, ocho del *Icterus* y seis del *Trogon* las identificadas como presentes en el paisaje (Sanfiorenzo 2008). En el caso del género *Dendroica* un 100% de sus especies fueron asociadas con los bosques de pino y roble como hábitat, los demás variaron en el número de especies reportadas como afines a estos. Además, este género fue el más generalista ya que al menos una especie fue reportada como presente en cada uso de suelo natural o agropecuario dentro del paisaje. El *Dendroica* es un género muy difundido y la mayoría de sus especies son migratorias, aunque algunas son residentes del paisaje (Howell y Webb 1995).

Con respecto al género *Icterus*, un 100% de las especies fueron reportadas en el bosque ribereño, en la regeneración natural y en el café bajo sombra. Todos los demás usos del suelo con árboles presentes fueron reportados como hábitat para al menos alguna especie de este género. Esto muestra la capacidad del *Icterus* de utilizar como hábitat usos del suelo perturbados, como lo son la regeneración natural, los sistemas agroforestales de café y los SSP.

Sobre el género *Trogon*, un 100% de las especies fueron reportadas para el bosque mixto. Además, solo una especie fue asociada a la regeneración natural y dos al café bajo sombra. Los demás usos del suelo agropecuario no fueron asociados a ninguna especie de este género (Cuadro 1). El género *Trogon* es el que cuenta con la menor cantidad de hábitats (149 km²) con una calidad mayor a 66, umbral establecido como hábitat funcional. Para este género los bosques de la zona representan un hábitat para más del 66% de las especies que lo componen.

Los géneros *Dendroica* e *Icterus* cuentan en ambos casos con 334 km² de hábitat con un valor mayor al 66%, sin embargo, difieren en la cantidad de área con valores de calidad mayor al 66% (Figura 1). Por ejemplo, el género *Icterus* cuenta con 222 km² de hábitat con un valor del 100%, mientras que el *Dendroica* solo cuenta con 44 km² de hábitat con este valor. De los tres géneros evaluados el género *Trogon* fue el que mostró las características de mayor dependencia a bosques y de las especies que componen este género son muy pocas las que están asociadas a hábitats perturbados (Howell y Webb 1995). Estas características muestran

Cuadro 1. Calidad de hábitat y valores de permeabilidad para los géneros *Trogon*, *Icterus* y *Dendroica*

Usos del suelo*	Índice de calidad de hábitat			Índice de permeabilidad		
	<i>Trogon</i>	<i>Icterus</i>	<i>Dendroica</i>	<i>Trogon</i>	<i>Icterus</i>	<i>Dendroica</i>
Bosque latifoliado denso	86	88	75	1	0,83	0,83
Bosque latifoliado ralo	86	88	75	1	0,83	0,83
Bosque de pino denso	71	75	100	1	0,83	0,83
Bosque de pino ralo	71	75	100	1	0,83	0,83
Bosque de roble	71	75	100	1	0,83	0,83
Bosque mixto	100	75	83	1	0,83	0,83
Bosque ribereño	86	100	83	1	0,83	0,83
Regeneración natural **	14	100	67	0,8	0,8	0,8
Café con sombra	29	100	75	0,4	0,66	0,83
Café sin sombra	0	50	25	0	0,3	0,3
Sistema agrosilvopastoril alta densidad	0	63	33	0,4	0,5	0,33
Sistema agrosilvopastoril baja densidad	0	63	33	0	0,5	0,33
Cultivos intensivos	0	0	17	0	0	0
Pasturas	0	0	25	0	0	0
Plantaciones forestales	29	88	75	0	0,66	0,83
Cercas vivas	0	13	25	0,6	0,5	1

*Usos no mencionados cuentan con valor de cero.

**Valores de permeabilidad adoptados del proyecto FRAGMENT.

a este género como el más afectado por la fragmentación, al reducirse la cantidad de hábitats naturales disponibles en el paisaje.

Respecto al rango de forrajeo el género *Dendroica* es el de menor tamaño y por lo tanto de menor rango de forrajeo (47 m). El género *Icterus* fue de un tamaño promedio mayor y su rango de forrajeo fue de 76 m,

mientras que el *Trogon* fue el género con las especies de mayor tamaño, para el cual se seleccionó el rango de forrajeo de 124 m.

La cantidad de parches funcionales fue menor en el género *Icterus*, con un total de 52 parches. El género *Dendroica* contó con 70 parches funcionales y el *Trogon* con 144 (Figura 2). El tamaño promedio de los parches fue menor

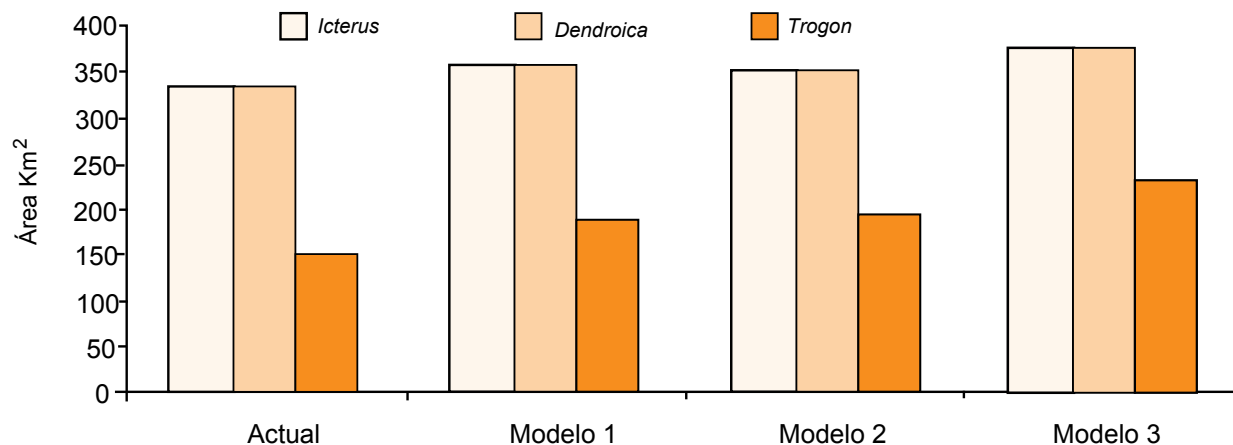


Figura 1. Área de hábitat funcional para los géneros evaluados en los diferentes modelos (*Icterus*, *Dendroica* y *Trogon*).

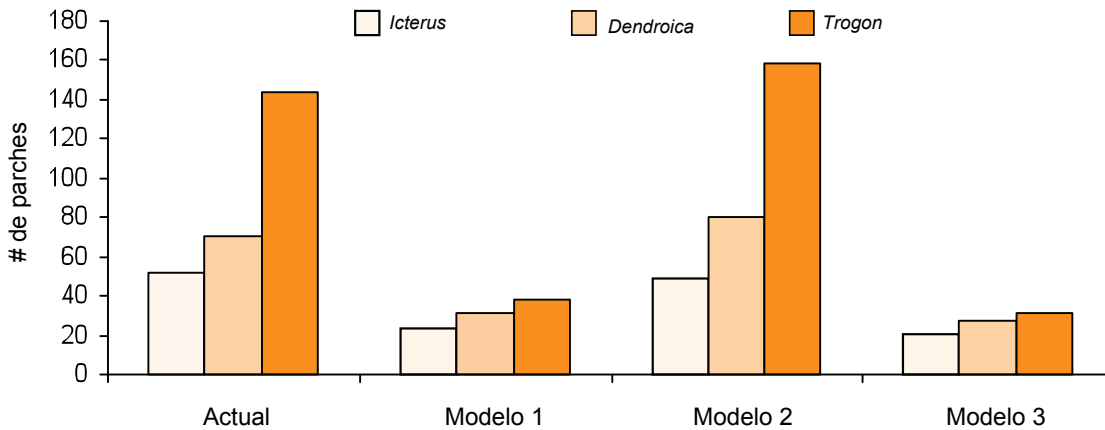


Figura 2. Número de parches funcionales para los géneros evaluados en los diferentes modelos (*Icterus*, *Dendroica* y *Trogon*).

en el género *Trogon* (51 ha) en comparación con el *Icterus* (233 ha) y el *Dendroica* (318 ha). Este último cuenta con el mayor número de los tres géneros analizados.

El género *Trogon* es el más afectado por la presente fragmentación del paisaje en la subcuenca del río Copán, solo el 25% de éste es capaz de proveer hábitat para todas las especies de este género. Además, es el género que cuenta con menor área total de hábitat funcional. No obstante, tiene el mayor número de parches y es de un tamaño medio menor en comparación con los otros géneros evaluados. La capacidad del *Trogon* de trasladarse por el paisaje será muy influenciada por la permeabilidad de éste a los diferentes usos del suelo fuera de sus hábitats ya que transportarse a través de sus parches por áreas de hábitat le es imposible debido al grado de fragmentación del campo.

Conectividad funcional

Existen dos principales componentes que influyen en la conectividad funcional para una especie, comunidad o proceso ecológico, estos son el componente estructural y el de comportamiento (Bennett 2004). El elemento estructural es determinado por el arreglo espacial de los hábitats en el paisaje y está influenciado por factores como la continuidad de hábitats apropiados, la distancia a ser recorrida de un hábitat a otro y la presencia de vías alternas, como por ejemplo corredores de movimiento. El componente de comportamiento está relacionado a la conducta de las especies en la estructura física del paisaje, está influenciado por la escala en la que una especie percibe y se mueve dentro del ambiente, sus requerimientos y grado de especialización de hábitat y la tolerancia a disturbios en el entorno. Por estas razones, aunque viven en el mismo paisaje especies con comportamientos distintos exhibirán diferentes niveles de conectividad (Bennett 2004).

Al analizar los datos para el género *Dendroica* obtuvimos valores de permeabilidad en los cuales las cercas vivas muestran los números más altos en el paisaje (uno), seguidas por los bosques (0,83). En el caso del *Icterus*, los usos del suelo con mayor permeabilidad fueron las áreas de bosques (0,83), seguidas del café bajo sombra (0,66). Por su parte, el género *Trogon* obtuvo una permeabilidad de uno en los bosques y de 0,6 en las cercas vivas (Cuadro 1).

En el caso del *Dendroica* este resulta ser un género en el cual sus especies fueron registradas como presentes en muchos de los usos del suelo dentro del paisaje. Este género es capaz de desplazarse por usos del suelo naturales como las zonas de bosques y usos antropogénicos como los sistemas agroforestales y cercas vivas. Cabe señalar que todas las especies evaluadas para desarrollar la permeabilidad estuvieron presentes en las cercas vivas, lo cual resalta el aporte de estas para la conectividad del *Dendroica*, dentro de un paisaje fragmentado. Por otro lado, el género *Icterus* mostró ser permeable tanto en las zonas de bosques como en los sistemas agroforestales de café y agrosilvopastoriles de alta y baja densidad. Este género evidencia ser tolerante a zonas con ciertos grados de perturbación. Sin embargo, en usos del suelo donde están presentes árboles dispersos se favorece la utilización de esas áreas por este género.

Por su parte, las zonas de bosques indican ser permeables al género *Trogon*, mostrando que dependen de estas zonas para su hábitat y para desplazarse a través del paisaje. Algunos estudios documentan el uso de las cercas vivas por este género resaltando nuevamente la contribución de estas a la conectividad en paisajes fragmentados. También, los sistemas agroforestales de

café y agrosilvopastoriles de alta densidad presentan ser permeables para este género, indicando la importancia de los árboles en los sistemas productivos para no inhibir la conectividad en paisajes agropecuarios (Harvey *et al.* 2006).

La conectividad dentro del paisaje fue diferente para los tres géneros evaluados (Figura 3). El índice de conectividad fue mayor para el género *Dendroica*, seguido del *Icterus* y por último el *Trogon*.

El género *Trogon* obtuvo la red de conectividad de mayor área 2.135 ha que conecta 112 de los 144 parches funcionales (77%). Un total de 1.555 ha fueron demarcados como corredores en el árbol mínimo de distancias por el análisis de FunConn, dentro de estas el mayor uso del suelo fue el del café bajo sombra con un total de 1.110 ha, seguido de la regeneración natural (313 ha) y finalmente los sistemas agrosilvopastoriles de alta densidad (108 ha). El género *Dendroica* cuenta con 65 de los 70 parches funcionales conectados (93%) por los corredores de 1.565 ha en total, el área del árbol mínimo de distancias fue de 207 ha y dentro de estos los sistemas agrosilvopastoriles de baja densidad fueron el uso del suelo dominante con 175 ha, seguido del café bajo sombra (14 ha) y los sistemas agrosilvopastoriles de baja densidad (11 ha). Un total de 48 de los 53 parches funcionales del género *Icterus* están relacionados mediante la red de conectividad (90%).

Esta red comprende un total de 1.311 ha cuyo árbol mínimo de distancias cubre un área de 188 ha. El uso de suelo dominante dentro de estos corredores son los

sistemas agrosilvopastoriles de baja densidad (173 ha), seguidos por los mismos sistemas pero de alta densidad (8 ha) (Sanfiorenzo 2008).

El género *Trogon* además de contar con menos cantidad de hábitats no posee una red de conectividad que una todos los parches funcionales y las distancias recorridas, a través de la red actual es mayor la conectividad en los géneros *Icterus* y *Dendroica*. Esto presenta una limitante para este género ya que la vulnerabilidad a cambios ambientales es mayor en poblaciones aisladas, situaciones como desastres naturales, invasión de patógenos y competencia de predadores lograrían ocasionar que poblaciones lleguen a niveles críticos y terminen extinguiéndose (Bennett 2004). Dentro de los corredores del género *Trogon* el café bajo sombra es el uso del suelo más representado, resaltando una vez más la contribución de estos sistemas agroforestales a la conectividad a nivel de paisaje. También, la regeneración natural y los sistemas agrosilvopastoriles de alta densidad son representados dentro de los corredores, lo cual indica la contribución de los SSP de alta densidad, que a pesar de ser áreas productivas aun permiten que en el paisaje haya movimiento de organismos dependientes de bosques, como el género *Trogon*.

Modelación

En general, con los criterios modelados las áreas de usos naturales aumentan y por consiguiente, las áreas de usos antropogénicos se ven reducidas. Además, se observó un aumento en la cantidad de sistemas agrosilvopastoriles de alta y baja densidad arbórea, así como la eliminación de las pasturas sin árboles.

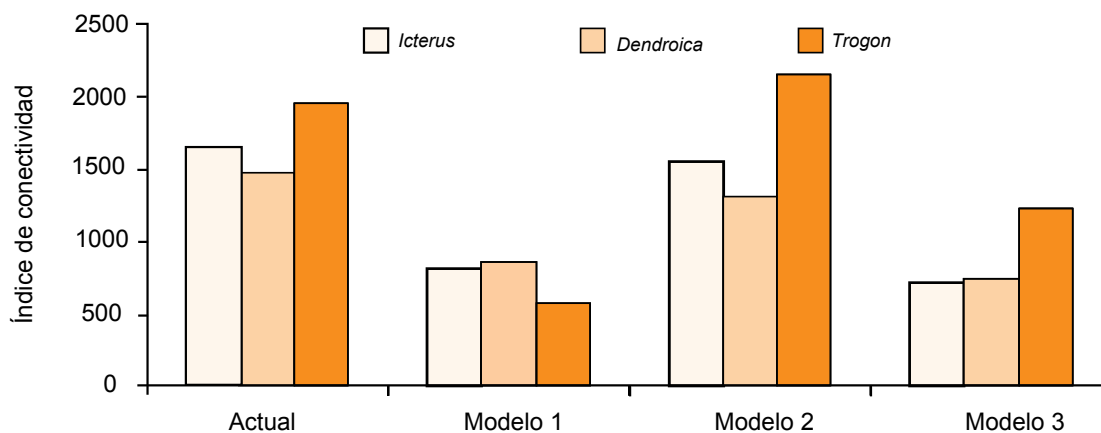


Figura 3. Índice de conectividad para los géneros evaluados en los diferentes modelos (*Icterus*, *Dendroica* y *Trogon*).

Conectividad: $C = 2E/N*(N-1)$, donde E = # de enlaces y N = # de parches (Urban y Keitt 2001, Jordán *et al* 2003), a mayor valor, mayor conectividad entre los parches existentes.

El primer modelo donde se introdujo una franja de bosques ribereños de 50 m en los ríos y quebradas de la subcuenca conllevó un cambio de uso en el 13% del área total del paisaje. El segundo modelo mostró un aumento de hábitat del 56% dentro del paisaje, mientras que el tercero presentó un aumento de hábitat del 67% del paisaje. Los cambios son debidos a un incremento en la cantidad de áreas naturales, así como en la incorporación de una mayor cantidad de sistemas agrosilvopastoriles de alta densidad en el campo (Sanfiorenzo 2008).

La cantidad de área de hábitat funcional fue mayor en los modelos evaluados en comparación con el paisaje actual (Figura 1). El primer modelo indicó un aumento de 41 km² para el género *Trogon* y de 24 km² para los géneros *Icterus* y *Dendroica*. Este modelo redujo el número de parches e incrementó la calidad de hábitats disponibles para los tres géneros. La reducción del número de parches se debe a que se amplía la conectividad estructural, parches que antes estaban separados se unen por medio de la franja de bosques ribereños, reagrupándose en uno solo, lo cual es de vital importancia para los organismos dependientes del bosque (Bennett 2004) como los del género *Trogon*. El tamaño promedio de los parches crece en el caso del *Dendroica* y del *Trogon*, lo cual se debe a lo mismo y además, es menor al presentado por el paisaje actual por el hecho de que las áreas que antes estaban desconectadas y debían ser alcanzadas por corredores ahora están conformando un solo parche, permitiendo a los organismo moverse entre ellas sin cruzar frontera alguna (Figura 2).

En la modelación de cambios de uso del suelo, según la pendiente (modelo dos), se obtiene un aumento en la cantidad del hábitat para los tres géneros. Este fue mayor para el género *Trogon*, debido a que se incluyeron bosques en las zonas con pendiente mayor al 40%, las cuales en su mayoría eran antes ocupadas por cafetales que ya representaban un hábitat para el *Dendroica* e *Icterus*, pero no para el *Trogon*. El número de parches se redujo para el género *Icterus* y *Dendroica* en este modelo ya que como en el modelo uno, parches que anteriormente estaban separados se unieron para conformar un solo parche.

Para el caso del género *Trogon* el número de parches creció porque las nuevas áreas que antes estaban ocupadas por zonas de producción como cafetales o sistemas agrosilvopastoriles son remplazadas por bosques en las pendientes mayores a un 40%.

El modelo tres señaló una intensificación de 83 km² adicionales de hábitat definido como funcional para el género *Trogon* y 42 km² para los géneros *Dendroica* e *Icterus*. Esta ampliación en el área de hábitat también produjo un efecto en la cantidad de parches funcionales para los géneros evaluados. Este modelo mostró el mayor crecimiento en la cantidad de hábitat para los tres géneros evaluados con respecto a los modelos uno y dos y al paisaje actual. En este modelo el número de parches es menor al del modelo dos para todos los géneros y es mayor para el género *Trogon*, con respecto al modelo uno y al paisaje actual, es decir, el tamaño promedio de los parches es mayor en este modelo según los demás modelos evaluados y el paisaje actual.

La conectividad del modelo tres es mayor a la del modelo uno y al paisaje actual. Por otra parte, la conectividad del modelo tres es menor a la del modelo dos, esto debido a que el número de parches a ser conectados es mayor al modelo uno y al paisaje actual y menor al modelo dos.

Para el género *Trogon*, el cual es el género más amenazado por el grado de fragmentación del paisaje aumenta el número y el área de los parches funcionales, además de la conectividad del campo con respecto al paisaje actual. Para este género y otros dependientes de los bosques este sería el modelo que más les beneficiaría para promover su conservación dentro del paisaje fragmentado de la subcuenca del río Copán.

Con respecto a la conectividad, los modelos variaron de acuerdo al índice de conectividad para los parches funcionales de cada género evaluado (Figura 3). El *Trogon* cuenta con la conectividad más baja en el paisaje actual. Sin embargo, en el modelo uno, dos y tres la conectividad para éste género crece, siendo superior a los demás. El índice de conectividad para los géneros *Dendroica* e *Icterus* fue más similar entre ellos, siendo superior en algunos casos el índice en *Dendroica* y en otros casos el del *Icterus*.

Los usos de suelos señalan en las redes de conectividad para cada género, según el modelo que los sistemas agrosilvopastoriles que están representados, como las mayores utilidades para los géneros *Dendroica* e *Icterus*. Para el género *Trogon* el café bajo sombra es el uso mayoritario en todos los modelos. Sin embargo, en el modelo dos y tres, en los cuales se incorporan nuevas áreas de SSP de alta densidad, aumentó la representación de este uso dentro de los corredores de este género.

La incorporación de los sistemas agrosilvopastoriles y bosques en estos modelos permite incrementar el hábitat, el número y el área de parches. También, disminuyen el área que debe ser recorrida por los géneros evaluados para moverse a través de los parches funcionales en el paisaje. Esto resulta realmente beneficioso para los géneros dependientes del bosque como el *Trogon* ya que se aumenta la disponibilidad de hábitats y la conectividad en el paisaje (Figura 4).

Por otra parte, los sistemas agrosilvopastoriles pueden ser importantes en la conservación genética de especies. La evidencia sugiere que para muchas especies y poblaciones de árboles el flujo de genes es alto a través de los sistemas, contribuyendo de esta manera al establecimiento de especies y al flujo o intercambio de genes entre poblaciones ya sean del mismo sistema o de áreas cercanas a este (Boshier 2004). Además, los sistemas agrosilvopastoriles contribuyen en las zonas de amortiguamiento para las áreas protegidas, dentro de estas zonas la combinación de sistemas de producción con

árboles es muy beneficiosa para el área, especialmente si se manejan árboles de especies nativas de la región. También, estos sistemas reducen el cambio drástico entre la zona protegida y las áreas de manejo intensivo del terreno (Jiménez *et al.* 2001).

CONCLUSIONES

El género *Dendroica* posee las características más generalistas dentro de los tres géneros evaluados. Por su parte, el *Icterus* cuenta con especies capaces de utilizar usos del suelo antropogénicos como hábitat. Sin embargo, presenta una preferencia dentro de sus especies por los sistemas con árboles en altas densidades, como los agrosilvopastoriles de alta densidad y los sistemas agroforestales de café. El género *Trogon* muestra características de dependencia a los usos del suelo naturales en la zona, de sus especies en el paisaje muy pocas pueden utilizar los usos del suelo perturbados como hábitat.

Los sistemas agrosilvopastoriles presentes contribuyen a la calidad del hábitat y a la conectividad dentro del

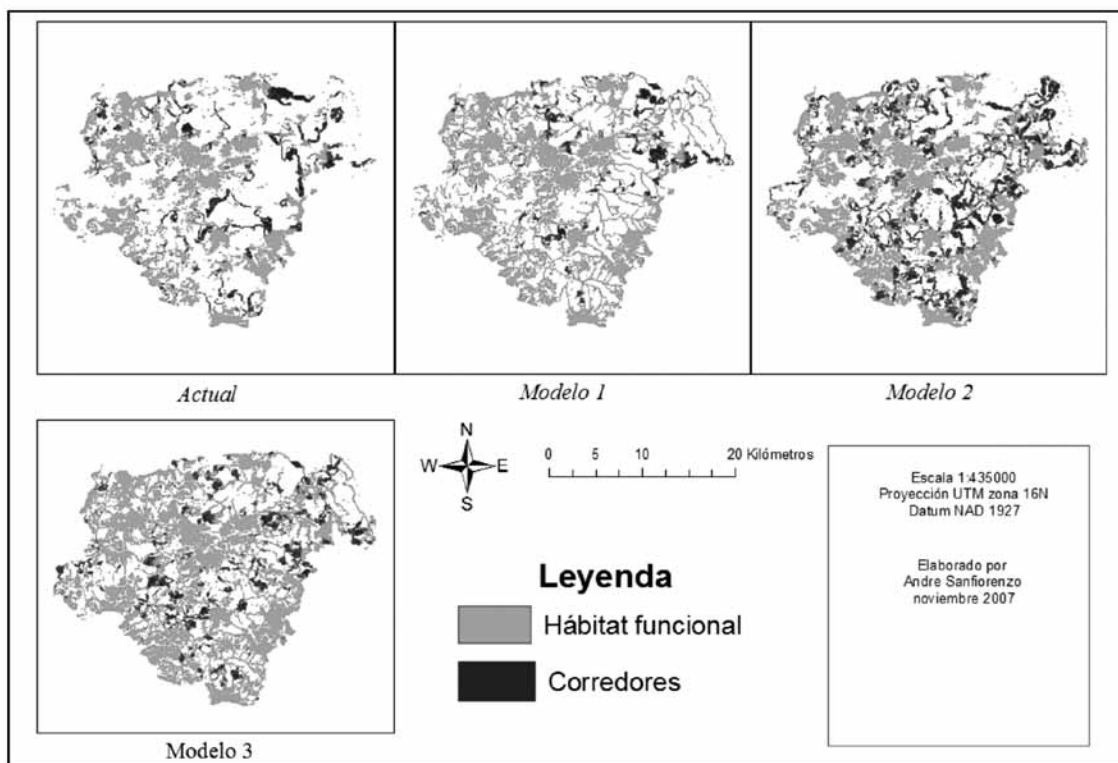


Figura 4. Hábitat funcional y corredores para el género *Trogon* en el paisaje actual.

Modelo 1: incorporación de una franja de bosque ribereño a ambos lados del cauce

Modelo 2: sistemas silvopastoriles de baja densidad en pendientes de 0-15%, alta densidad de 16-40% y bosques en pendientes mayores al 40%

Modelo 3: combinación del modelo uno y dos

paisaje gracias a la presencia arbórea en el campo. Estos sistemas ofrecen hábitat y facilitan el desplazamiento de especies tolerantes a la perturbación, pero su colaboración es reducida para organismos dependientes del bosque como los del género *Trogon*, ya que al aumentar la densidad de árboles dentro de los sistemas agrosilvopastoriles se genera para los organismos dependientes del bosque y permeables de estos sistemas mayor facilidad en el movimiento a través del paisaje.

De esta manera, al combinar los sistemas agrosilvopastoriles con una franja de bosques ribereños se produce un crecimiento en la disponibilidad de hábitat y la conectividad para organismos dependientes del bosque, dentro de un paisaje agropecuario fragmentado como el de la subcuenca del río Copán, Honduras. Además, se logra disminuir el área que debe ser recorrida para atravesar el paisaje, facilitando la dispersión y contribuyendo a la persistencia de poblaciones viables dentro del agropaisaje.

El estudio demuestra el valor de los sistemas agroforestales sobre la conectividad funcional en especies importantes para la conservación. También, presenta la gran necesidad de intervenciones coordinadas a nivel de paisaje para obtener impactos mayores sobre la conservación. Los esfuerzos para la conservación llevados a cabo por productores aislados pueden ser bien intencionados, no obstante, si estos mismos esfuerzos no son replicados por sus vecinos el aporte es mínimo.

En nuestra modelación explícitamente elegimos intervenciones basadas en la agricultura sostenible como la conservación de zonas ribereñas, el aumento en densidades de árboles en pendientes medianas y la regeneración de bosques en pendientes fuertes. Sin embargo, además de los beneficios en el desarrollo de hábitats y la conectividad funcional estas intervenciones contribuirían a la protección de la calidad de agua a través de la función de filtración por zonas ribereñas (Robinson 1995), a la reducción de derrumbes y erosión mediante la reforestación de pendientes altas (Bruijnzeel 1990) y al aumento productivo ganadero con el uso de la sombra moderada (Murgueitio 1999, Pomareda 2000), así como a una diversificación para los productores.

Nuestros modelos mantienen las pendientes bajas típicas de las zonas de mayor productividad en la agricultura intensiva, por esto el resultado prominente de esta modelación es que manteniendo el aspecto productivo de la zona el establecimiento espacialmente

estratégico de sistemas agroforestales puede, al mismo tiempo, mejorar el valor de conservación del paisaje, las funciones del ecosistema y la productividad del campo. Los resultados del trabajo provienen de un ejercicio de modelación basado en datos de varios estudios de campo. Nos es imposible replicar estos modelos de forma experimental, pero sugerimos que los modelos de conectividad funcional deben jugar un papel importante en la planificación y cogestión de paisajes dominados por la agricultura ya que estos modelos permiten la identificación de áreas focales, tanto para la conservación como para la producción y sirven como herramientas en el diseño de planes de intervención.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Bennett, AF. 2004. Enlazando el paisaje el papel de los corredores y la conectividad en la conservación de la vida silvestre. UICN-Mesoamerica. San José, CR. 276 p.
- Boshier, DH. 2004. Agroforestry Systems: Important Components in Conserving the Genetic Viability of Native Tropical Tree species? In Schroth, G; da Fonseca, GAB; Harvey, CA; Gascon, C; Vasconcelos, HL; Izac, AN. eds. Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. Washington, DC. Island Press. p. 290-313.
- Bruijnzeel, L.A. 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: UNESCO International Hydrological Programme. Francia, Paris.
- Estrada, A; Coates-Estrada, R; Merritt, DA. 1997. Antropogenic landscape changes and avian diversity at Los Tuxtlas, Mexico. *Biodiversity and conservation* 6:19-42.
- Gallardo, R. 2007. Diversidad de aves en el departamento de Copán, Honduras (en preparación).
- Harestad, AS; Bunnell, FL. 1979. Home Range and Body Weight-A Reevaluation. *Ecology* 60 (2):389-402.
- Harvey, CA; Medina, A; Sanchez, D; Vilchez, S; Hernandez, B; Saenz, JC; Maes, JM; Casanoves, FB; Sinclair, FL. 2006. Patterns of animal diversity in different forms of tree cover in agricultural landscapes. *Ecological Applications* 16(5):1986-1999.
- Howell, SNG; Webb, S. 1995. A Guide to the Birds of Mexico and Northern Central America. Oxford University Press, New York. p. 851.
- Jordán F; Báldi A; Orci KM; Rác I; Varga Z. 2003. Characterizing the importance of habitat patches and corridors in maintaining the landscape connectivity of a *Pholidoptera transsylvanica* (Orthoptera) metapopulation. *Landscape Ecology* 18(1):83-92.
- Jimenez, F; Amend, T; Köpdel, E. 2001. Agroforestería, Zonas de Amortiguamiento y Áreas Protegidas. In Jiménez, F; Muschler, R; Kopsell (eds). Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales. Turrialba, CR, CATIE. p.139-154.
- Laurance, SGW. 2004. Landscape connectivity and biological corridors. In Schroth, G; da Fonseca, GAB; Harvey, CA.; Gascon, C; Vasconcelos, HL; Izac, AN. eds. Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. Washington, DC. Island Press. p. 50-64.
- McIntyre, S; Hobbs, R. 1999. A framework for conceptualizing human effects on landscape and its relevance to management and research models. *Conservation Biology* 13(6):1282-1292.



Una reinita amarilla (*Dendroica petechia*) y un trogon (*Trogon violaceus*). Foto: Programa Monitoreo de Aves, CATIE

- McNeely, JA; Scherr, SJ. 2002. Ecoagriculture: strategies to feed the world and save biodiversity. Washington, DC. Island Press. p.87-198.
- Murgueitio, E. 1999. Sistemas agroforestales para la producción ganadera en Colombia. Eds. C Pomareda; H Steinfeld. In Seminario Intensificación de la ganadería en Centroamérica: beneficios económicos y ambientales. 1 ed. Nuestra tierra, San José, CR. CATIE-FAO-SIDE. p. 219-246.
- Noss, RF. 1983. A regional landscape approach to maintain diversity. *BioScience*. 33:700-706.
- _____. 1991. Landscape connectivity: different functions at different scales. In Hudson, W.E. Ed. Landscape linkages and biodiversity. Washington, DC. Island Press. p. 27-39.
- Pomareda, C; Stenfield, H. 2000. Intensificación de la Ganadería en Centroamérica: Beneficios económicos y ambientales. Nuestra Tierra. San José, CR. 334 p.
- Ramírez Sandoval, L.R. 2007. Contribución ecológica y cultural de los sistemas silvopastoriles para la conservación de la biodiversidad en Matiguás, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 175 p.
- Robinson, J.S. 1995. Release of nitrogen and phosphorus from poultry litter. *Journal Water Quality. USA*. v.24. p. 62-67.
- Sanfiorenzo Gil de Lamadrid, A. 2008. Contribución de diferentes arreglos silvopastoriles a la conservación de la biodiversidad, mediante la provisión de hábitat y conectividad en el paisaje de la subcuenca del río Copán, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 100 p.
- Santivañez Galarza, J.L. 2005. Efecto de la estructura, composición y conectividad de las cercas vivas en la comunidad de aves en Río Frío, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 116 p.
- Schroth, G; da Fonseca, GAB; Harvey, CA; Vasconcelos, HL; Gascon, C; Izac, AN. 2004. Introduction: The Role of Agroforestry in Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. In Schroth, G; da Fonseca, GAB; Harvey, CA.; Gascon, C; Vasconcelos, HL; Izac, AN. eds. Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. Washington, DC. Island Press. p. 1-12.
- Stiles, GF; Skutch, A. 2007. Guía de aves de Costa Rica. 4ta. edición Trad. L. Roselli, illus. D. Garner. Instituto Nacional de Biodiversidad, Heredia, Costa Rica. 576 pp.
- Taylor, PD; Fahrig, L; Henein, K; Merriam, G. 1993. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos* 68(3):571-573.
- Theobald, DM; Hobbs, NT. 1999. Calculating Landscape Fragmentation using a Gradient-based Approach (en línea). Paper presentado en "ESRI User Conference, San Diego, CA".
- Theobald, DM; Normasn, JB; Sherburne, MR. 2006. FunConn v1 Users Manual: ArcGIS tools for functional connectivity modeling (en línea). Consultado 7 oct. 2006.
- Urban, D; Keitt, T. 2001. Landscape Connectivity: A Graph-Theoretic Perspective. *Ecology* 82(5):1205-1218.
- Useche, DC. 2006. Diseño de redes ecológicas de conectividad para la conservación y restauración del paisaje en Nicaragua, Centroamérica. Tesis Mag. Turrialba, CR, CATIE. 233 p.
- Vílchez, S; Harvey, C; Sánchez, D; Medina, A; Hernández, B. 2003. Diversidad de aves en un paisaje fragmentado de bosque seco en Rivas, Nicaragua (en línea). En publicación: Revista Encuentro. 68 UCA, Universidad Centroamericana, Managua, Nicaragua.