

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

ENERO / JUNIO 2020 - VOLUMEN 30 (1)



Cuantificación estructural forestal según uso de la tierra y reservas de carbono de FEIMA, Turrialba, Costa Rica

Land Use-Based Forest Structure and Carbon Stocks of FEIMA, Turrialba, Costa Rica

Aldo Quesada-Chacón,
Escuela de Ingeniería de Biosistemas e Instituto de Investigaciones en Ingeniería,
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
aldo.quesada@ucr.ac.cr

Shiori Nakajima,
Instituto de Investigaciones en Ingeniería y Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA),
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
shiori.nakajima@ucr.ac.cr

Pedro A. Rojas Camacho,
Instituto de Investigaciones en Ingeniería,
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
pedro.rojas@ucr.ac.cr

Carlos Rojas Alvarado,
Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Instituto de Investigaciones en Ingeniería
y Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, UCR.,
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
carlos.rojasalvarado@ucr.ac.cr

Recibido: 20 de julio 2019

Aceptado: 10 de diciembre 2019

Resumen

El seguimiento de las características del bosque es relevante en el contexto de cambio climático. En este estudio, se ha evaluado la estructura vertical y horizontal de tres secciones con diferente uso de la tierra en una finca experimental, así como las reservas de carbono de un parche boscoso de bosque húmedo premontano de 28 ha en sucesión temprana en el Caribe de Costa Rica. Esta evaluación se ha hecho con base en una hipótesis de homogeneidad forestal. Los resultados indicaron diferencias estructurales por uso de la tierra y que, para el parche boscoso el promedio del DAP, la altura de los árboles y la apertura del dosel fueron 1.15 m, 20.83 m y 18.5%, respectivamente. De las seis variables estudiadas, el DAP y la apertura de dosel fueron las más importantes para determinar la estructura forestal y los resultados no mostraron diferencias con respecto a una clasificación previa hecha con base en especies forestales codominantes. Un cálculo de la biomasa sobre el suelo determinó que la finca estudiada tiene entre 100-130 t por hectárea para un total de 1372-1795 t de carbono total sobre el bosque. Este estudio representó el primer acercamiento a la investigación forestal de la estación experimental bajo análisis y ha sido importante para determinar parte

de la línea base de información de esta. Se espera que futuros estudios puedan utilizar la información de la presente investigación para darle seguimiento a la dinámica en ese sitio.

Palabras clave:

Bosque húmedo premontano, cambio climático, carbono neutralidad, Costa Rica, ecología forestal, Turrialba

Abstract

The monitoring of forest characteristics is relevant in the context of climate change. In this study, both vertical and horizontal forest structure were analyzed in an experimental station according to land use and carbon stocks were determined for a 28 ha successional forest patch on the Costa Rican Caribbean Region. This evaluation was performed assuming a hypothesis of homogeneity in forest structure. Results indicated structural differences by land use and showed that average DBH, tree height and canopy openness for the forest patch were 1.15 m, 20.83 m and 18.5%, respectively. Of the six structural variables determined, DBH and canopy openness were the two most important and results did not show differences based on a previous classification made with the codominant tree species. A calculation of the biomass showed that the forest patch contained between 100-130 t/ha above the ground and a total carbon stock of 1372-1795 t. This investigation represented the first approach to study the forest associated with the experimental station under scrutiny and was relevant to determine part of its baseline data. It is expected that future studies can use the information presented herein for their purposes.

Keywords:

Climate Change, Carbon Neutrality, Costa Rica, Forest Ecology, Premontane Moist Forest, Turrialba

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques son espacios de tierra primordiales para mantener servicios ecosistémicos como la biodiversidad, la fijación de carbono y el control parcial del ciclo hidrológico (Ojea, Loureiro, Alló y Barrio, 2016). Estas zonas tienen alto potencial para fomentar la educación, el ocio y el bienestar personal (Sampaio, De La Fuente, Albuquerque, da Silva Souto, y Schiel, 2018). Así, en el contexto moderno de desarrollo, los bosques son considerados sistemas biológicos con peso sobre las economías regionales (Glazyrina, Faleichik, y Yakovleva, 2015). Por ejemplo, en Costa Rica se ha calculado que los bosques representan hasta un 2% del PIB local (Banco Central de Costa Rica, 2016).

Para documentar el aporte de los bosques a la dinámica ambiental del entorno se utilizan una serie de técnicas forestales que permiten el seguimiento de variables en el tiempo (e.g., Sistema Nacional de Áreas de Conservación, 2014). De esta forma, la caracterización estructural del bosque, entendida como una documentación técnica en sus ejes espaciales horizontal y vertical, es relevante en el establecimiento de líneas base de trabajo. Así se puede dar seguimiento a un bosque y estudiar el efecto de variables externas como el cambio climático o la fragmentación boscosa, en un sitio determinado (Shugart, Saatchi, y Hall, 2010). Por lo tanto, y para efectos de gestión forestal, una buena determinación de estas características permite tomar decisiones de manejo (ver Schall, Schulze, Fischer, Ayasse, y Ammer, 2018).

Al mismo tiempo, debido a que los bosques acumulan biomasa sobre el suelo en forma de árboles, su rol en planes de sostenibilidad es primario (Sears, 2016). Esta biomasa, producto de la fijación de carbono atmosférico es muy relevante para la planificación de carbono neutralidad y descarbonización (e.g., Van Meerbeek, Muys, y Hermy, 2019) por cuanto los bosques son los sumideros primarios de carbono en ecosistemas terrestres (Avalos, 2016). A pesar de que parte del carbono fijado en un bosque es transferido al suelo por descomposición y parte regresa a la atmósfera por respiración, el carbono en los bosques tiene un papel muy activo en la dinámica de dióxido de carbono en la atmósfera (Houghton, Byers, y Nassikas, 2015).

La Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA) es una estación experimental de 45 hectáreas, administrada por la Universidad de Costa Rica, que cuenta con un parche boscoso de alrededor de 28 hectáreas. Debido a su reciente oficialización (Resolución R-27-2014, 2014), es poca la documentación que se ha generado sobre FEIMA, sin embargo, su localización en la zona de Turrialba, dentro de la franja del bosque húmedo tropical, es relevante en el contexto de sostenibilidad agroforestal. Su carácter experimental permite además que en este sitio se puedan llevar a cabo investigaciones a largo plazo que permitan monitorear el efecto del cambio climático en Costa Rica.

De esta forma, el presente proyecto ha sido diseñado con la idea de cuantificar estructuralmente las comunidades forestales asociadas con los tres usos de la tierra en FEIMA y calcular las reservas de carbono del parche boscoso de la finca utilizando una estrategia de partición del bosque para evaluar además uniformidad en las variables estudiadas. El macroanálisis de estas variables en un contexto

regional y temporal tiene el potencial de vincularse con iniciativas de desarrollo rural integrado y favorecer el mejoramiento de prácticas de manejo del bosque a nivel institucional y regional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este proyecto se llevó a cabo en la Finca Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA) ubicada en el distrito de La Suiza en Turrialba, Costa Rica durante los años 2017 y 2018. Esta finca está rodeada de terrenos agrícolas y cuenta con tres usos de la tierra que corresponden con a) agricultura (cultivos varios según necesidades de los estudiantes), b) ganadería y c) bosque. La última zona corresponde a un parche forestal en regeneración de alrededor de 30 años, dominado por árboles de *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook, que fue reforestado por el Instituto Costarricense de Electricidad como compensación ambiental por la construcción del embalse Angostura.

2.1 Selección de puntos de muestreo

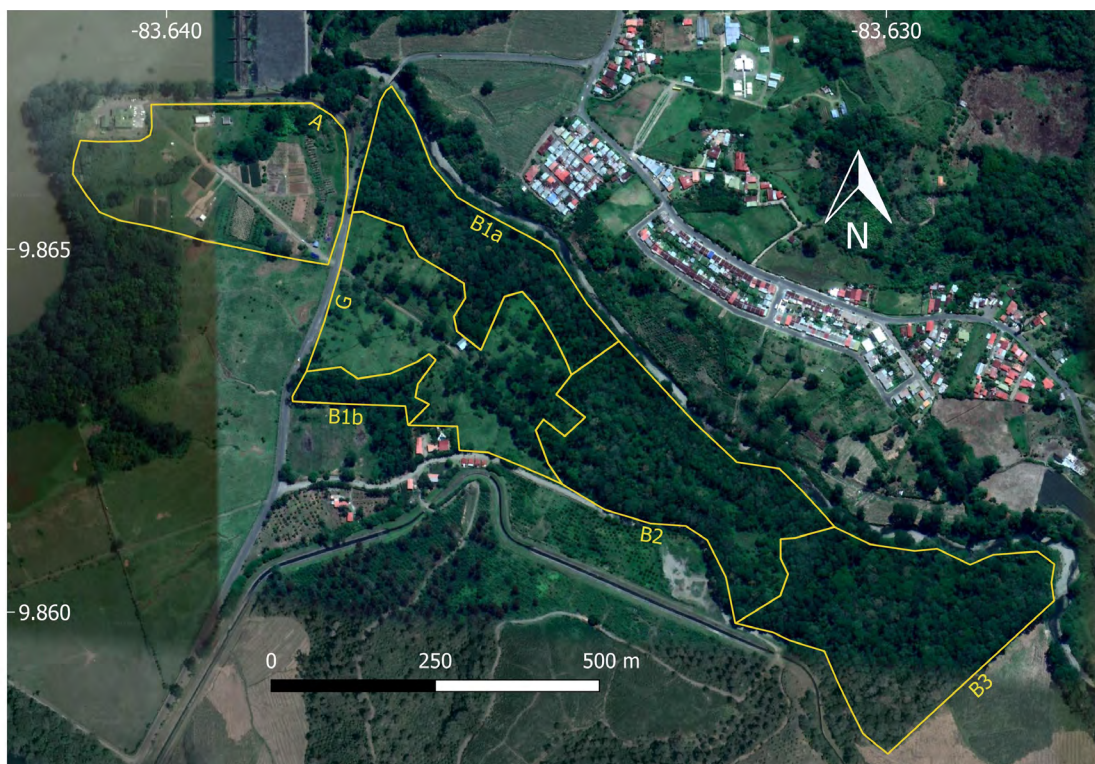


Figura 1. Esquema general de zonificación de FEIMA y sectorización de la zona forestal utilizados como base para los análisis del presente estudio. A=zona agrícola, G=zona de ganadería, B1=bosque noroeste (*E. poeppigiana*-*E. deglupta*), B2=bosque medio (*E. poeppigiana*-*A. idiopoda*), B3=bosque sureste (*E. poeppigiana*-*En. cyclocarpum*)

Por medio de fotografías satelitales se realizó una división espacial de la finca en parcelas de alrededor de 100x100 m. Con esta estrategia *a priori* se seleccionó un punto de muestreo por parcela que, en algunos casos, por efecto del borde de la propiedad, no quedó localizado en el centro

de esta. Tal proceso aleatorio, generado en el software QGIS permitió minimizar el sesgo de selección de los 45 puntos de estudio y definió 28 parcelas de bosque, 10 de agricultura y 7 de ganadería. La sección de bosque fue dividida en tres zonas denominadas a) sureste, b) media y c) noroeste (Figura 1). Esto último se hizo con base a diferencias observadas en campo en las especies forestales codominantes con *E. poeppigiana*, que fueron *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Abarema idiopoda* (S.F. Blake) Barneby y J.W. Grimes y *Eucalyptus deglupta* Blume, para las tres zonas, respectivamente. El presente estudio, sin embargo, no incluyó un componente de inventario forestal y se enfocó en las diferencias estructurales entre las tres zonas.

2.2 Registro de variables estructurales

En una selección de 18 parcelas de bosque se hizo una caracterización horizontal y vertical del bosque. Para la primera, se determinaron el diámetro de los árboles a altura de pecho (DAP, medido entre 1.3 y 1.6 m de altura), la distancia entre árboles (distancia vecinal) y el área basal. Para la segunda se determinaron la altura de los árboles, el Índice de Área Foliar (LAI por sus siglas en inglés) y la apertura del dosel. Los diámetros y distancias se midieron directamente por triplicado en el campo con cintas métricas y las alturas se midieron por triplicado con un altímetro Haga. El LAI y la apertura de dosel se calcularon a partir de fotografías hemisféricas obtenidas a 1 m de altura (ver Fournier y Hall, 2017) usando el software Gap Light Analyzer, v. 2.0. Durante este último proceso se calcularon los coeficientes de nubosidad, la fracción espectral y la fracción de rayos utilizando sensores de radiación PAR colocados en el sitio además de información de la estación meteorológica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$\text{Índice de nubosidad (kt)} = \frac{H}{H_0} \quad (1)$$

Donde H es la radiación incidente en una superficie plana en la tierra y H_0 es la radiación incidente en una superficie plana fuera de la atmósfera de la tierra.

$$\text{Fracción espectral (Fe)} = \frac{\text{PAR}}{R} \quad (2)$$

Donde PAR es la radiación total en el rango de 400-700 nm en la zona de estudio y R es la radiación total en la zona de estudio.

$$\text{Fracción de rayos (Fr)} = \left[1 - \exp\left(-3.044 kt^{2.436}\right) \right] \quad (3)$$

Donde, kt es el índice de nubosidad.

En las zonas de FEIMA dedicadas a la agricultura (zonas de experimentación agrícola con cultivos que cambian constantemente) y a la ganadería también se determinaron la altura de los árboles, el LAI y la apertura de dosel con base en información de todas los puntos de muestreo.

La idea de haber calculado tales variables en estas zonas además del bosque ha sido contrastar el efecto del manejo diferencial en las mismas sobre la vegetación circundante. Para ello también se ha establecido un Índice de Disturbio (ID) a partir de la presencia/ausencia de plantas de a) ortiga (*Urera baccifera*), b) guarumo (*Cecropia sp.*), c) palmas falsas (*Cyclanthaceae*) y d) pastos (*Poaceae*). La presencia de estos grupos de plantas está asociada con algún tipo de disturbio vegetal.

El ID se ha calculado asignando un valor de 0.3125 (2.5 veces * 1/8 de probabilidad de existencia) a la presencia de pastos y ortigas y un valor de 0.1875 (1.5 veces * 1/8 de probabilidad de existencia) a la presencia de guarumos y palmas falsas. El anterior cálculo asumió que los pastos y plantas de ortiga tuvieron un 60% de probabilidad de presencia mayor que los árboles de guarumo y las palmas falsas, según observaciones previas hechas en el sitio. De esta forma, el ID tuvo un rango total de valores de 0 a 1 con el valor más alto asignado a una zona con alto disturbio o alta presencia de las plantas indicadoras.

2.3 Determinación de reservas de carbono

Además de lo anterior, con la información del DAP se calculó la biomasa, el carbono total sobre el suelo, las unidades equivalentes de dióxido de carbono y la biomasa subterránea de forma similar a Rojas y Calvo (2014). Para lo anterior se utilizó la ecuación generalizada para bosques costarricenses de Chou y Gutiérrez-Espeleta (2012):

$$B^{\frac{2}{5}} = 0.1438 + 0.2051 * DAP + 0.3216 * DAP * \delta - 0.0744 (DAP - 50) * X \quad (4)$$

Donde B es la biomasa (kg), δ es el peso específico básico (equivalente a 0.23 g/cm³ para el caso de *E. poeppigiana*) y X es una variable dicotómica (1 si DAP ≥ 50 cm y 0 si DAP < 50 cm).

2.4 Análisis estadístico

La distribución de los valores asignados a cada variable estudiada fue analizada a partir de pruebas de hipótesis estadísticas, con un valor de probabilidad de rechazo de la hipótesis nula de 0.05. Este mismo enfoque se siguió para estudiar la uniformidad de las variables en las tres secciones del bosque. En todos los casos se evaluó la normalidad de los datos, se utilizó el Análisis de Varianza (ANOVA) y cuando las diferencias fueron encontradas se realizó una prueba *post hoc* de Tukey. Para los datos estructurales se realizó un Análisis de Componentes Principales con el fin de redimensionar la matriz de datos original y encontrar patrones en la variabilidad del set de datos.

El ID y la radiación total transmitida calculada para un sitio, también determinada con el software GLA, fueron usados como variables de respuesta para determinar modelos lineales generalizados a partir de las variables independientes en toda la finca. Para ello, se identificaron las variables independientes de peso sobre la matriz de datos a partir de Análisis Multivariado de Varianza (MANOVA) y se crearon los modelos lineales a partir de regresiones simples. De forma

similar, la biomasa sobre el suelo fue utilizada para evaluar las variables estructurales determinadas únicamente en el parche boscoso.

Con las variables de mayor peso para la determinación de diferencias entre las secciones de uso de la tierra más las variables de respuesta, se construyeron mapas para toda la finca utilizando el software QGIS. Estos mapas fueron contruidos con el datum WGS84 a partir de la caracterización de geoposicionamiento de cada punto de muestreo:

3. RESULTADOS

De las variables determinadas, se pudo observar que los valores generales obtenidos para el parche boscoso y los establecidos para cada sección de este fueron un poco diferentes para la sección media codominada por *E. poeppigiana* y *A. idiopoda* (Tabla 1). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas para casi todas estas variables según sección del bosque. Cuando se compararon los valores obtenidos en la caracterización vertical del bosque con los determinados para las secciones agrícola y de ganadería en FEIMA (ver apéndice 1), si se observaron diferencias significativas (p.e. $F(4,44)=20.48, P<0.0001$ para altura de árboles, $F(4,44)=69.96, P<0.0001$ para LAI y $F(4,44)=98.41, P<0.0001$ para apertura de dosel).

Tabla 1. Valores observados en los puntos de muestreo para las diferentes variables registradas en la presente investigación según uso de la tierra y componente de investigación.

| Uso de la tierra | Estructura horizontal | | | | Estructura vertical | | | Reservas de carbono | |
|------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|--|
| | DAP, m | Distancia vecinal, m | Área basal, m ² /ha | Índice de disturbio | Altura, m | Índice de Área Foliar | Apertura de dosel, % | Biomasa, t/ha | Unidades equivalentes CO ₂ , t/ha |
| Agrícola | 0 | | | 0.00 | 3.56 | 0.00 | 99.96 | | |
| Agrícola | 0 | | | 0.00 | 3.86 | 0.00 | 99.96 | | |
| Agrícola | 0 | | | 0.00 | 5.61 | 0.20 | 81.73 | | |
| Agrícola | 0 | | | 0.00 | 3.46 | 0.36 | 69.59 | | |
| Agrícola | 0 | | | 0.00 | 7.72 | 0.19 | 79.59 | | |
| Agrícola | 0 | | | 0.00 | 5.69 | 0.00 | 99.84 | | |
| Agrícola | 0 | | | 0.00 | 2.95 | 0.00 | 99.83 | | |
| Agrícola | 0 | | | 0.00 | 5.49 | 0.13 | 88.02 | | |
| Agrícola | 0 | | | 0.00 | 2.44 | 0.01 | 99.37 | | |

| | | | | | | | | | |
|-----------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|--------|--------|
| Agrícola | 0 | | | 0.00 | 4.27 | 0.00 | 99.74 | | |
| Ganadería | 0.79 | | | 0.31 | 16.16 | 0.44 | 68.53 | | |
| Ganadería | 0.87 | | | 0.31 | 13.01 | 0.05 | 93.60 | | |
| Ganadería | 1.27 | | | 0.31 | 10.77 | 0.45 | 73.47 | | |
| Ganadería | 1.19 | | | 0.50 | 23.88 | 0.56 | 71.84 | | |
| Ganadería | 0.72 | | | 0.31 | 15.75 | 0.25 | 82.08 | | |
| Ganadería | 1.03 | | | 0.50 | 23.07 | 2.24 | 14.81 | | |
| Ganadería | 1.15 | | | 0.38 | 18.70 | 1.97 | 18.57 | | |
| Ganadería | 1.61 | | | 0.00 | 0.00 | 0.51 | 73.86 | | |
| Ganadería | 1.63 | | | 0.50 | 16.26 | 0.86 | 46.33 | | |
| Ganadería | 0.73 | | | 0.50 | 0.00 | 0.29 | 79.01 | | |
| Bosque | 0.79 | | | 0.50 | 27.74 | 1.84 | 25.02 | | |
| Bosque | 1.53 | | | 0.50 | 30.39 | 2.17 | 25.52 | | |
| Bosque | 1.03 | | | 0.50 | 24.59 | 2.46 | 14.11 | | |
| Bosque | 0.66 | | | 0.50 | 29.67 | 1.21 | 38.76 | | |
| Bosque | 0.66 | | | 0.63 | 19.82 | 1.84 | 20.70 | | |
| Bosque | 1.02 | | | 0.50 | 13.11 | 2.24 | 14.29 | | |
| Bosque | 2.01 | | | 0.50 | 24.90 | 2.75 | 12.31 | | |
| Bosque | 1.59 | 7.06 | 54.08 | 0.19 | 16.46 | 2.01 | 16.12 | 52.88 | 95.01 |
| Bosque | 1.07 | 10.57 | 91.38 | 0.50 | 20.53 | 3.15 | 14.76 | 151.17 | 271.63 |
| Bosque | 1.23 | 6.77 | 17.62 | 0.19 | 21.34 | 2.08 | 15.29 | 54.56 | 98.04 |
| Bosque | 1.42 | 5.47 | 61.67 | 0.50 | 18.09 | 1.44 | 34.24 | 154.17 | 277.02 |
| Bosque | 1.01 | 7.20 | 35.12 | 0.50 | 19.92 | 2.42 | 13.24 | 133.95 | 240.69 |
| Bosque | 1.20 | 5.76 | 53.62 | 0.50 | 21.34 | 2.43 | 12.31 | 96.71 | 173.77 |
| Bosque | 1.46 | 6.06 | 47.00 | 1.00 | 20.83 | 1.91 | 17.51 | 113.21 | 203.42 |

| | | | | | | | | | |
|--------|------|------|--------|------|-------|------|-------|--------|--------|
| Bosque | 0.99 | 2.90 | 91.37 | 0.81 | 14.43 | 2.15 | 18.83 | 146.00 | 262.34 |
| Bosque | 1.75 | 4.93 | 51.59 | 0.50 | 14.23 | 1.67 | 27.14 | 55.97 | 100.57 |
| Bosque | 0.83 | 4.19 | 76.07 | 0.31 | 15.75 | 1.96 | 18.64 | 128.34 | 230.60 |
| Bosque | 1.36 | 3.90 | 130.85 | 0.31 | 20.33 | 1.40 | 30.72 | 268.92 | 483.20 |
| Bosque | 1.00 | 5.64 | 62.59 | 0.31 | 20.33 | 2.13 | 21.56 | 72.36 | 130.03 |
| Bosque | 1.44 | 5.24 | 57.78 | 0.19 | 19.41 | 2.45 | 12.05 | 132.98 | 238.94 |
| Bosque | 0.64 | 6.90 | 43.76 | 0.50 | 29.17 | 2.28 | 14.37 | 135.98 | 244.33 |
| Bosque | 1.00 | 9.86 | 28.79 | 0.50 | 21.65 | 3.07 | 9.10 | 45.21 | 81.23 |
| Bosque | 1.16 | 8.68 | 51.51 | 0.50 | 17.38 | 2.23 | 14.05 | 104.21 | 187.25 |
| Bosque | 1.08 | 5.20 | 64.92 | 0.50 | 18.39 | 3.10 | 10.40 | 115.69 | 207.88 |
| Bosque | 0.81 | 5.47 | 22.48 | 0.50 | 21.04 | 2.39 | 12.57 | 66.24 | 119.02 |

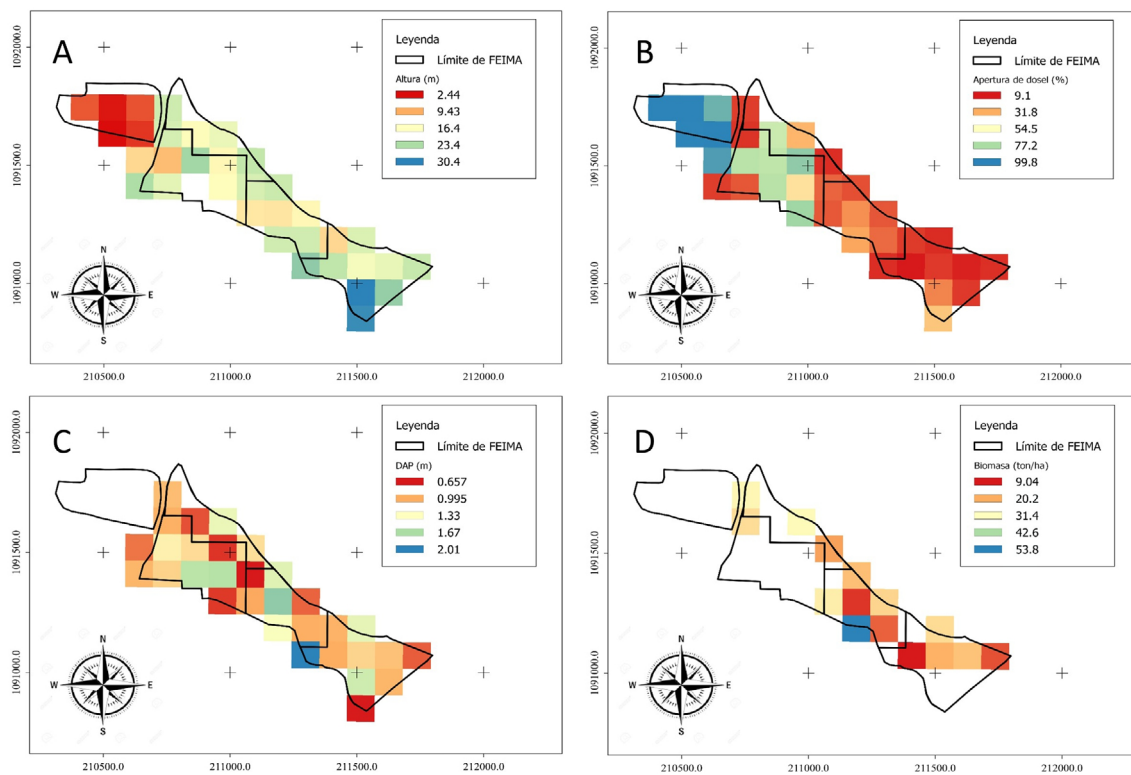


Figura 2. Mapas de la distribución espacial de tres variables estudiadas y de los valores de biomasa determinados para FEIMA según el presente estudio. A=altura de los árboles, B=Apertura de dosel, C=DAP, E=Biomasa.

La altura de los árboles y el LAI fueron menores en las secciones agrícola (4.19 ± 1.66 m, 0.09 ± 0.01 m²/m²) y de ganadería (13.76 ± 8.28 m, 0.76 ± 0.74 m²/m²) que en el bosque (20.83 ± 4.73 m, 2.19 ± 0.49 m²/m²). De forma esperada, la apertura de dosel fue menor en el bosque (18.54 ± 7.71 %) que en las secciones agrícola (91.76 ± 11.75 %) y de ganadería (62.20 ± 20.79 %). Con estos resultados, se observó un crecimiento en la altura de los árboles y en el LAI en el sentido sección agrícola-ganadería-bosque (ver Figura 2) con diferencias entre secciones de hasta un 328% (incremento en la altura de los árboles de la sección agrícola a la de ganadería). La apertura de dosel mostró un patrón inverso con un crecimiento de hasta 335% (sección bosque a ganadería) en la dirección bosque-ganadería-agrícola. La correlación entre la creciente altura de los árboles y el decrecimiento de la apertura de dosel fue muy alta ($r^2=0.96$), lo que indicó que el bosque es alométrico.

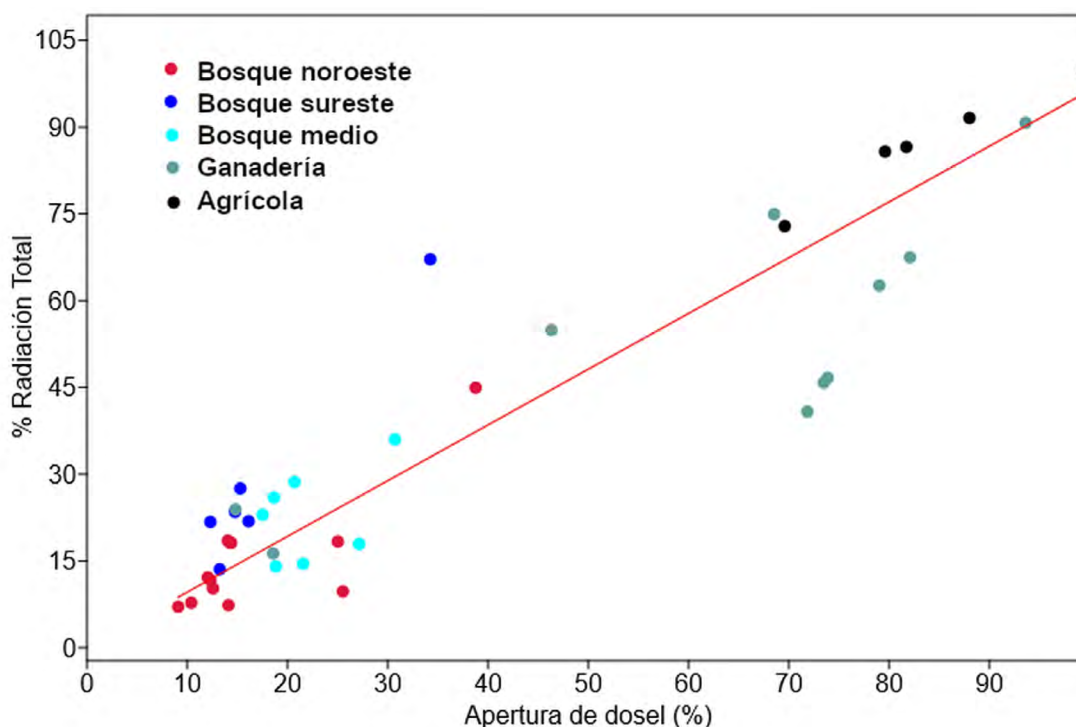


Figura 3. Modelo lineal generalizado obtenido para la relación entre la apertura de dosel y la radiación total incidente sobre el suelo en FEIMA mostrando los puntos asociados con las diferentes secciones y zonas estudiadas. Este modelo es la base de la ecuación 5

Al analizar el Índice de Disturbio y la radiación total en relación con las variables estructurales verticales medidas en toda la finca, se encontraron diferencias en el modelo general ($F(6,80)=31.53$, $P<0.001$) dadas por las diferencias al nivel de las variables de respuesta. La máxima relación con el Índice de Disturbio fue ofrecida por la altura de los árboles ($r^2=0.48$, $P=0.03$) pero la relación entre variables no fue alta. La apertura de dosel, sin embargo, mostró una relación alta y significativa ($r^2=0.89$, $P=0.00008$) con el porcentaje de radiación total incidente sobre el suelo (ver Figura 3). De esta forma, para FEIMA, existe una relación inversa entre cobertura vegetal y radiación incidente que se puede explicar según el siguiente modelo lineal generalizado, con un error de alrededor de 3%:

$$\text{Radiación total en suelo} = 0,974 * \text{apertura de dosel} + 1.66 \quad (5)$$

Cuando se analizó únicamente el parche boscoso, en donde también se caracterizó el bosque en su componente horizontal, se encontró que únicamente en la distancia vecinal hubo diferencias por zona dentro del bosque ($F(2,15)=4.08$, $P=0.04$). En este caso, la zona noroeste del bosque tuvo un valor más alto (7.14 ± 1.82 m) que las zonas media (4.60 ± 1.17 m) y sureste (6.89 ± 1.98 m). El DAP y el área basal no mostraron diferencias por zona del bosque. En general, al aumentar la distancia vecinal entre los árboles, aumentó la altura ($r^2=0.78$) y el DAP ($r^2=0.68$).

De forma relevante, un análisis de componentes principales ejecutado con todas las variables estructurales mostró que alrededor del 67% de la variabilidad de los datos fue explicada por la apertura de dosel y el DAP. Desde el punto de vista estructural, las zonas noroeste y sureste del bosque presentaron mayores similitudes entre sí, que entre ellas y la zona media (Figura 4). En un modelo general de análisis de la biomasa como variable de respuesta, las diferencias significativas entre las zonas del bosque ($F(6,11)=6.04$, $P=0.005$) fueron dadas por el área basal ($F(1,11)=19.5$, $P=0.001$). Esta última variable, mostró una relación media y significativa con la biomasa ($r^2=0.63$, $P=0.001$), sin embargo, no fue lo suficientemente alta para generar un modelo predictivo lineal confiable.

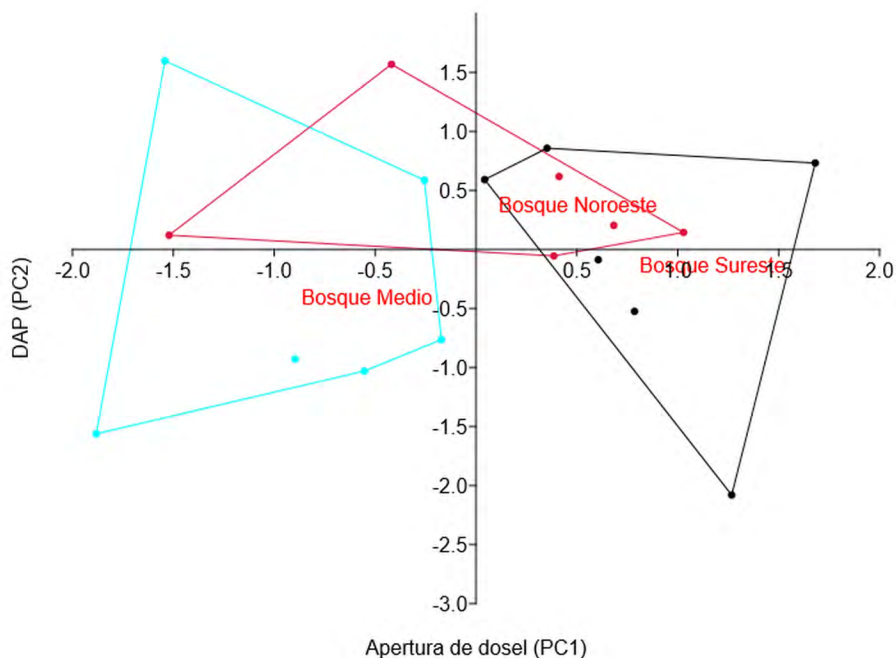


Figura 4. Biplot del análisis de componentes principales ejecutado con todas las variables estructurales determinadas en la zona de bosque de FEIMA. Se muestran las agrupaciones determinadas según las tres secciones del bosque estudiadas

Con los datos obtenidos se determinó que el parche boscoso de FEIMA tiene entre 100-130 t de biomasa por hectárea (Tabla 2). No se encontraron diferencias en la estimación de biomasa por sección del bosque. El cálculo del carbono acumulado con base en la información sobre el suelo del parche boscoso indicó un valor de reserva de entre 1372-1795 t. Si se suma el carbono acumulado bajo el suelo, la finca podría tener entre 2410-3150 t de carbono fijado. Estos cálculos suponen que, durante el periodo de crecimiento del parche forestal, los árboles en este sitio han neutralizado entre 8820-11530 t CO₂ atmosférico.

Tabla 2. Valores promedio (y desviación estándar) de los estimadores de reservas de carbono por hectárea, en toneladas, calculados para las tres secciones del bosque de FEIMA

| Sección boscosa | Biomasa Terrestre | Carbono sobre el suelo | Unidades equivalentes de CO ₂ | Biomasa subterránea |
|-----------------|-------------------|------------------------|--|---------------------|
| Noroeste | 130.80 (60.56) | 64.09 (29.67) | 235.03 (108.81) | 48.40 (22.41) |
| Medio | 107.24 (36.99) | 52.55 (18.13) | 192.69 (66.47) | 39.68 (13.69) |
| Sureste | 100.05 (29.48) | 49.03 (14.45) | 179.78 (52.97) | 37.02 (10.91) |

4. DISCUSIÓN

La Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos es de reciente establecimiento y sus primeros años fueron utilizados en la consolidación administrativa. Sin embargo, al ser una unidad experimental adscrita a una institución de enseñanza superior de Costa Rica, es esperable que tenga algún tipo de documentación primaria para poder atraer a investigadores y estudiantes (e.g., Derwent, Simmonds, O'Doherty, Manning, y Spain, 2019). Con la presente investigación se avanzó en ese proceso de generación de una línea base de trabajo para monitoreo de características forestales con implicaciones en análisis de cambio climático.

En ese sentido, ha sido relevante para la gestión futura de esta finca (Jucker et al., 2017), haber podido determinar que si bien se observaron contrastes en la estructura vegetal entre los tres tipos de zonas presentes (diferentes usos del suelo), dentro de la zona de bosque no se documentaron mayores diferencias. A pesar de lo anterior, es importante mencionar que este estudio no incluyó un componente de caracterización taxonómica de los árboles presentes, por lo que dicha sectorización dentro de la zona forestal no puede quedar descartada (ver Hirose, Kawata, y Matsumura, 2018). Sencillamente, desde el punto de vista estructural forestal, se determinó que el bosque en el sitio de estudio es para efectos prácticos, una unidad funcional.

Ha sido interesante observar que las diferencias en los valores asociados con algunas de las variables estructurales estudiadas tuvieron discrepancias mayores a 300% entre zonas de la finca. Si bien esto no es extraño (Magnago, Rocha, Meyer, Martins, y Meira-Neto, 2015), demuestra que existe una marcada zonificación existente en el sitio, que no tiene ecotonos transicionales

amplios presumiblemente por su tamaño. Esto tiene implicaciones grandes en términos de dinámica biológica y gestión a futuro (Bettinger, 2017). Por ejemplo, la cobertura vegetal en el bosque redujo en un 70% la radiación transmitida directa que ingresa al sistema forestal (no mostrado antes), en comparación con la zona dedicada a la agricultura. Un efecto tan drástico de reducción de radiación incide sobre el potencial uso que se le quiera dar a esa zona en la actualidad.

El carácter alométrico del bosque en FEIMA permite que su estudio a futuro pueda incluir componentes de investigación con alta aplicabilidad (Djomo y Chimi, 2017). De hecho, la viable determinación de la biomasa a partir del área basal, cuya correlación no fue alta en este estudio, es un componente que puede estudiarse más a fondo en futuros proyectos. Un aumento en el número de observaciones, quizás a partir de una metodología espacial mixta como la sugerida por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (2014) podría permitir una mejor evaluación de esa relación. En todo caso, la importancia de la apertura de dosel y del DAP como variables estructurales de peso, facilita además que estudios futuros puedan utilizar estas características para evaluar la progresión del sistema forestal y del efecto de agentes externos sobre este (Reiche et al., 2016).

Una recomendación para la gestión futura de FEIMA podría ser combinar los resultados estructurales acá mostrados con el análisis de suelos de la finca o con futuros estudios de diversidad biológica (ver Bohn y Huth, 2017). Lo anterior podría ayudar a determinar el efecto primario del suelo sobre las características vegetales del sistema en cuestión o la distribución espacial de la biota (ver Nguyen, Uria-Diez, y Wiegand, 2016) y su implicación en la complejidad sistémica. En todo caso, se espera que la utilización del sistema de cuadrículas del presente estudio se mantenga, para potenciar la información georreferenciada ya obtenida y para incrementar el nivel de integración analítica al que se podría llegar.

Por lo menos con los datos obtenidos en este proyecto, ha sido interesante observar que la zona media del bosque en el sitio de estudio ha sido algo diferente a las zonas sureste y noroeste del parche boscoso, que fueron más similares entre sí. Si se observa el esquema espacial de la finca, es posible observar que es precisamente la sección media la que tiene el menor ancho, y que podría estar siendo afectada de forma particular por la cercanía de ambos bordes boscosos en tal construcción. Lo anterior ha sido observado por Kunert, El-Madany, Aparecido, Wolf, y Potvin (2019) en relación con los bordes y el centro funcional del bosque.

En términos de biomasa y reservas de Carbono, la finca estudiada mostró valores similares a lo determinado en otras investigaciones nacionales en la misma zona de vida (p.e. Santiago-García, Finegan, y Bosque-Pérez, 2019). Desde este punto de vista, el parche forestal en FEIMA se comportó de forma esperada. Sin embargo, es interesante valorar en un contexto más amplio, la cuantificación obtenida en este estudio. Por ejemplo, las unidades de dióxido de carbono calculadas entre ocho y once mil toneladas son relevantes en el contexto nacional de carbono neutralidad (ver Flagg, 2018).

Asumiendo que el bosque de FEIMA tiene alrededor de 30 años en proceso de restauración, se podría decir que este bosque ha fijado entre 260 y 360 t de CO₂ atmosférico por año o entre 8 y 12 t CO₂/ha/año. Según la Unión Europea (ver Muntean et al., 2018), Costa Rica emitió poco más de

ocho millones de toneladas de CO₂ en el año 2018, lo que significa que el país registró emisiones en el orden de 1592 t CO₂/ha/año. Si bien es cierto que una relación directa entre ambas estimaciones en realidad requiere de otros cálculos adicionales (p.e. emisiones producidas por el bosque en sí), de forma general se podría decir que la compensación de carbono ofrecida por el bosque de FEIMA se encuentra en el orden del 0.05% de las emisiones nacionales. Lo anterior parecería trivial, pero en el marco de adaptación al cambio climático un aporte, por más pequeño que sea, sigue siendo importante (Berndes et al., 2016).

En resumen, la presente investigación ha mostrado que la cuantificación de variables forestales en el contexto moderno es de utilidad para el monitoreo de los recursos naturales. Dentro de los planes nacionales de manejo forestal y los movimientos internacionales de conservación de recursos, esta documentación es relevante para la toma de decisiones. En el caso de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, se espera que el proceso de investigación que se ha comenzado pueda continuar reforzándose con elementos contextuales de otras disciplinas para facilitar los procesos integrados de adaptación al cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Se extiende un agradecimiento a Lolita Durán, Alex Murillo y Werner Rodríguez por permitir la realización de este proyecto. Esta investigación ha sido financiada por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica (731-B8-034). Se agradece el apoyo en el campo de Josué Mora Chacón y el apoyo logístico ofrecido por la Sede del Atlántico de la Universidad de Costa Rica. Finalmente, se agradece a dos revisores anónimos por comentarios útiles durante el proceso editorial.

REFERENCIAS

- Avalos, G. (2016). How Do Forests Work? Primary Production, Energy and Forest Growth. En S. Molina-Murillo, & C. Rojas. (Eds.) *The Paradigm of Forests and the Survival of the Fittest* (pp. 17-38). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Banco Central de Costa Rica. (2016). *Cuentas Bosque: documento de trabajo*. San José, Costa Rica: BCCR.
- Berndes, G., Abt, B., Asikainen, A., Cowie, A., Dale, V., Egnell, G., ... y Yeh, S. (2016). *Forest Biomass, Carbon Neutrality and Climate Change Mitigation*. Joensuu, Finlandia: European Forest Institute.
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P. y Grebner, D. L. (2017). *Forest Management and Planning* (2a ed.). Londres, Inglaterra: Academic Press.
- Boachá Sampaio, M., De La Fuente, M. F., Albuquerque, U. P., Souto, A. D. S. y Schiel, N. (2018). Contact with Urban Forests Greatly Enhances Children's Knowledge of Faunal Diversity. *Urban Forestry & Urban Greening*, 30, 56-61. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.01.006>
- Bohn, F. J. y Huth, A. (2017). The Importance of Forest Structure to Biodiversity-Productivity Relationships. *Royal Society Open Science*, 4, 1-12. <https://doi.org/10.1098/rsos.160521>
- Chou, S. W. y Gutiérrez-Espeleta, E. (2012). Ecuación para estimar la biomasa arbórea en los bosques tropicales de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 26, 41-54. <https://doi.org/10.18845/tm.v26i2.1402>

- Derwent, R. G., Simmonds, P. G., O'Doherty, S. J., Manning, A. J. y Spain, T. G. (2019). A 24-Year Record of High-Frequency, in situ, Observations of Hydrogen at the Atmospheric Research Station at Mace Head, Ireland. *Atmospheric Environment*, 203, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.050>
- Djomo, A. N. y Chimi, C. D. (2017). Tree Allometric Equations for Estimation of Above, Below and Total Biomass in a Tropical Moist Forest: Case Study with Application to Remote Sensing. *Forest Ecology and Management*, 391, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.022>
- Flagg, J. A. (2018). Carbon Neutral by 2021: The Past and Present of Costa Rica's Unusual Political Tradition. *Sustainability*, 10, 296. <https://doi.org/10.3390/su10020296>
- Fournier, R. A. y Hall, R. J. (Eds.). (2017). *Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications* (Vol. 28). Nueva York: Springer.
- Glazyrina, I. P., Faleichik, L. M. y Yakovleva, K. A. (2015). Socioeconomic Effectiveness and "Green" Growth of Regional Forest Use. *Geography and Natural Resources*, 36, 327-334. <https://doi.org/10.1134/S1875372815040022>
- Hirose, Y., Kawata, S. y Matsumura, N. (2018). Forest Zoning Criteria in Conservation Forest: Case Study in Komono Town, Mie Prefecture. *Forest Resources and Mathematical Modeling*, 17, 1-9. <https://doi.org/10.15684/formath.17.002>
- Houghton, R. A., Byers, B. y Nassikas, A. A. (2015). A Role for Tropical Forests in Stabilizing Atmospheric CO₂. *Nature Climate Change*, 5, 1022-1023. <https://doi.org/10.1038/nclimate2869>
- Jucker, T., Caspersen, J., Chave, J., Antin, C., Barbier, N., Bongers, F., ... y Coomes, D. A. (2017). Allometric Equations for Integrating Remote Sensing Imagery into Forest Monitoring Programmes. *Global Change Biology*, 23, 177-190. <https://doi.org/10.1111/gcb.13388>
- Kunert, N., El-Madany, T. S., Aparecido, L. M. T., Wolf, S. y Potvin, C. (2019). Understanding the Controls over Forest Carbon Use Efficiency on Small Spatial Scales: Effects of Forest Disturbance and Tree Diversity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 269-270, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.007>
- Magnago, L. F. S., Rocha, M. F., Meyer, L., Martins, S. V. y Meira-Neto, J. A. A. (2015). Microclimatic Conditions at Forest Edges Have Significant Impacts on Vegetation Structure in Large Atlantic Forest Fragments. *Biodiversity and Conservation*, 24, 2305-2318. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0961-1>
- Muntean, M., Guizzardi, D., Schaff, E., Crippa, M., Solazzo, E., Olivier, J. G. J. y Vignatti, E. (2018). *Fossil CO₂ Emissions of all World Countries - 2018 Report*. Bruselas, Bélgica: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/30158>
- Nguyen, H. H., Uria-Diez, J. y Wiegand, K. (2016). Spatial Distribution and Association Patterns in a Tropical Evergreen Broad-Leaved Forest of North-Central Vietnam. *Journal of Vegetation Science*, 27, 318-327. <https://doi.org/10.1111/jvs.12361>
- Ojea, E., Loureiro, M. L., Alló, M. y Barrio, M. (2016). Ecosystem Services and REDD: Estimating the Benefits of Non-Carbon Services in Worldwide Forests. *World Development*, 78, 246-261. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.002>
- Reiche, J., Lucas, R., Mitchell, A. L., Verbesselt, J., Hoekman, D. H., Haarpaintner, J., ... y Herold, M. (2016). Combining Satellite Data for Better Tropical Forest Monitoring. *Nature Climate Change*, 6, 120-122. <https://doi.org/10.1038/nclimate2919>
- Resolución R-27-2014. *La Gaceta Universitaria*, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica, 10 de febrero de 2014.
- Rojas, C. y Calvo, E. (2014). Forest Biomass, Carbon Stocks and Macrofungal Dynamics: A Study Case in Costa Rica. *International Journal of Forestry Research*, 607372. <https://doi.org/10.1155/2014/607372>

- Santiago-García, R. J., Finegan, B. y Bosque-Pérez, N. A. (2019). Soil is the Main Predictor of Secondary Rain Forest Estimated Aboveground Biomass across a Neotropical Landscape. *Biotropica*, 51, 10-17. <https://doi.org/10.1111/btp.12621>
- Schall, P., Schulze, E. D., Fischer, M., Ayasse, M. y Ammer, C. (2018). Relations Between Forest Management, Stand Structure and Productivity across Different Types of Central European Forests. *Basic and Applied Ecology*, 32, 39-52. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.02.007>
- Sears, R. R. (2016). Forests, Sustainability and Progress: Safeguarding the Multiple Dimensions of Forests Through Sustainable Practices. En S. Molina-Murillo & C. Rojas. (Eds), *The Paradigm of Forests and the Survival of the Fittest* (pp. 196-220). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Shugart, H. H., Saatchi, S. y Hall, F. G. (2010). Importance of structure and Its Measurement in Quantifying Function of Forest Ecosystems, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115, G00E13. <https://doi.org/10.1029/2009JG000993>
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación. (2014). *Manual de campo para el inventario forestal nacional de Costa Rica: diseño de parcela y medición de variables de sitio y dasométricas*. San José, Costa Rica: Programa REDD/CCAD-GIZ.
- Van Meerbeek, K., Muys, B. y Hermy, M. (2019). Lignocellulosic Biomass for Bioenergy Beyond Intensive Cropland and Dorests. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.009>