



RIQUEZA Y DIVERSIDAD ARBÓREA DEL BOSQUE DE TIERRA FIRME EN EL PARQUE NACIONAL NATURAL AMACAYACU, AMAZONIA COLOMBIANA

Eyder J. Agudelo O.¹, Dairon Cardenas López², Alvaro J. Duque M.¹

Panorámica del Bosque, PNN. Amacayacu

RESUMEN

En el presente estudio, mediante curvas especies-área, especies-individuos y diversidad-individuos, se evaluó la riqueza y diversidad arbórea ($DAP \geq 10\text{cm}$) a escala local en una parcela permanente de 5-ha en un bosque de tierra firme (TF) en el PNN Amacayacu, Colombia. Adicionalmente, usando el índice Alfa de Fisher, se estimó el número de especies esperado para áreas más grandes, incluyendo los bosques de TF del PNN Amacayacu. Se encontraron 534 especies y 2.797 individuos. El valor observado del Alfa de Fisher para las primeras 5-ha fue de 195,84, el cual estuvo muy por encima del valor promedio por hectárea reportado para los bosques más diversos del mundo. El valor utilizado para las extrapolaciones, el cual corresponde al de 1.000 individuos, fue de 179,19. El número de especies estimado para las primeras 10-ha, 25-ha, y las 27,970-ha de TF fue de 617, 775 y 2.085 sp, respectivamente. La falta de existencia de una asíntota en los modelos especies-área y especies-individuos es una prueba de la alta riqueza de especies a escala local. La falta de linealidad a escala logarítmica de los modelos, los cuales presentaron tendencia a la concavidad hacia abajo, pone de manifiesto el submuestreo de la riqueza arbó-

rea en este tipo de bosque a esta escala de análisis. Los resultados de este estudio posicionan los bosques de TF del PNN de Amacayacu entre los más diversos del mundo. En total, se estima que en esta área protegida se podría estar albergando hasta un tercio del total de especies estimadas para la Amazonía colombiana.

Palabras clave:

Alfa de Fisher, conservación, extrapolación, parques nacionales.

ABSTRACT

Tree species richness and diversity in terra firme forests at the Amacayacu National Park, colombian Amazonia. In this study we assessed tree ($DBH \geq 10\text{cm}$) species richness and diversity by mean of species-area, species-individuals, and species-diversity curves at a local scale in the Amacayacu National Park, colombian Amazonia. The Fisher's Alpha index was also employed to estimate the expected number of tree species in 25-ha, 50-ha, and terra firme in the Amacayacu park. In total we recorded 534 species and

¹Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

²Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, SINCHI.

2797 individuals. The Alpha Fisher value for the 5-ha was 195.84, which was between the highest values reported for other tropical forests around the world. Fisher's alpha showed a tendency to stability around 1000 individuals ($\alpha = 179.19$). The expected number of species in 10 ha, 25 ha, 50 ha, and tierra firme (29.970 ha) were 617, 775, and 2085, respectively. The lack of an asymptote in both species-area and species-individual curves along with the value of Z (0.4), emphasize the undersampling still occurring at the scale of a 5-ha plot. The results of this study highlight Amacayacu as one of the most diverse places in the world. In total, we estimated that this protected area could harbour up a third of the total number of tree species expected in Colombian Amazonia.

Key words:

Fisher's Alpha, conservation, extrapolation, national parks

INTRODUCCIÓN

La curva especies-área ha sido uno de los pilares fundamentales en ecología y conservación (Rosenzweig, 1995). Sin embargo, en los bosques tropicales de tierras bajas la existencia de asíntotas en la curva especies-área para árboles a escala local parece ser más

un mito que un patrón factible en la realidad. Una de las principales razones es que, debido a la alta diversidad, la relación entre la riqueza de especies y el área ha demostrado una tendencia a la concavidad, además de ser altamente dependiente del tamaño de muestra (Condit *et al.*, 1996). Por este motivo, su uso como herramienta para la conservación y extrapolación es limitado (He *et al.*, 2002). Técnicamente, se ha reportado que en muchos casos el uso del número de individuos en vez del área, o de índices en vez del número de especies, permite estandarizar y entender de forma más objetiva la tendencia de la diversidad (Condit *et al.*, 1996; Gotelli & Colwell, 2001).

Conocer la riqueza de especies o diversidad regional, con base en muestreos parciales, permitiría identificar de forma más precisa los modelos y prioridades de conservación (Pimm *et al.*, 1995; Condit *et al.*, 1998). No obstante, el gran problema práctico radica en que la mayor parte de los muestreos realizados con base en parcelas pequeñas (0.1-ha a 1-ha) subestima la diversidad local o alfa (Condit *et al.* 2005). Por esta razón, el uso de índices de diversidad como el Alfa de Fisher, el cual ha demostrado ser robusto a las variaciones del tamaño de la unidad muestral (Condit *et al.*, 1996), tiene una alta utilidad para entender, estimar y extrapolar de forma más precisa los patrones de diversidad.



En pequeños espacios alta diversidad

El presente estudio se realizó en la zona sur de Colombia en el PNN Amacayacu, departamento del Amazonas, sobre bosques de TF reconocidos en la Amazonia noroccidental por su alta diversidad (Gentry, 1988a; Valencia *et al.*, 2004; Duque *et al.*, 2009). Con base en los datos provenientes de las primeras 5-ha de especies de dosel (DAP ≥ 10 cm) de una parcela permanente de 25-ha, que viene siendo establecida bajo los lineamientos del Centro Tropical de Ciencias Forestales, CTFS (Condit, 1998), se espera: 1) Tipificar la riqueza y diversidad a escala local de este bosque. 2) Estimar el número esperado de especies arbóreas de dosel en un bosque de tierra firme, cuando se incrementa el área a 10-ha, 25-ha y al área de tierra firme de todo el parque. Con este estudio se busca proveer herramientas e identificar prioridades y objetos de conservación, que permitan el fortalecimiento de las áreas protegidas y la preservación de la biodiversidad natural en los bosques de la Amazonia colombiana y noroccidental.

MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio está localizada en un bosque tropical de TF, ubicado al sur del PNN Amacayacu, en el extremo sur de la Amazonia colombiana (Departamento del Amazonas), con coordenadas entre 3°02' y 3°47' Latitud Sur y 69°54' y 70°25' Latitud Oeste (Figura 1). El Parque tiene un área total de 2.930 km² y presenta elevaciones que oscilan entre 80 y 200 (msnm) (Rudas & Prieto, 1998). Según el sistema de zonas de vida de Holdridge (1978), el área de estudio se clasifica como Bosque muy húmedo Tropical (Bmh-T). La temperatura no presenta diferencias significativas entre invierno y verano durante el año, lo cual determina una isoterma con un valor medio de 25.8°C. La humedad relativa es muy alta, con un promedio anual de 86%. La precipitación alcanza un total de 3.216 mm anuales; el régimen de precipitación es del tipo unimodal-biestacional, con un periodo de concentra-

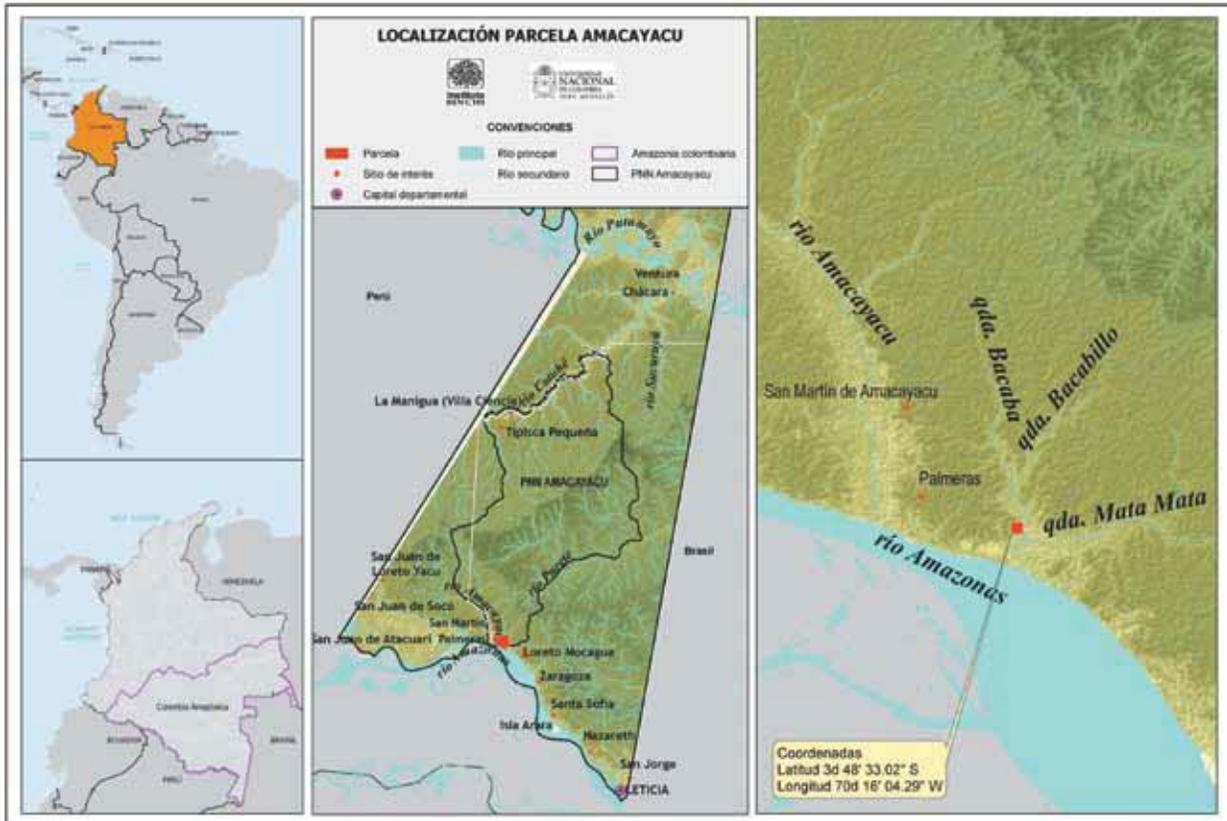


FIGURA 1. LOCALIZACIÓN EL ÁREA DE ESTUDIO

ción de lluvias entre octubre y mayo, y un periodo de menor precipitación entre junio y septiembre (Rudas & Prieto, 1998).

El área de estudio presenta suelos donde predominan texturas que van desde arcillosas, franco-arcillosas hasta franco-limo-arcillosas y, en ocasiones, francas (Rudas & Prieto, 1998).

Métodos de muestreo

La parcela evaluada tiene un área rectangular de 100 m x 500 m (5 ha), establecida en el año 2007. Fue dividida en 125 cuadrantes de 20 m x 20 m, formando una grilla. Cada cuadrante de 20 m x 20 m fue, a su vez, dividido en cuadrantes de 10 m x 10 m, y estos últimos divididos en cuadrantes más pequeños de 5 m x 5 m, referenciados en un mapa de coordenadas cartográficas (X,Y). En cada una de las cinco hectáreas se censaron todos los individuos arbóreos, incluyendo palmas y helechos arbóreos, con diámetros iguales o mayores a 10 cm a la altura del pecho (DAP). Estos individuos fueron marcados, mapeados, medidos, colectados y, posteriormente, las muestras botánicas fueron depositadas en el Herbario Amazónico Colombiano (COAH), donde fueron identificadas taxonómicamente y conservadas como soporte de la información generada en el proyecto.

Curvas especies-área y especies-individuos

Para el análisis de estas curvas, el área muestreada fue dividida en cuadrantes de 20 m x 20 m, 50 m x 50 m y 100 m x 100 m. Para cada caso se consideraron cuadrantes independientes, no traslapados, en los cuales se realizó el conteo del número promedio de especies e individuos para generar las curvas de acumulación de especies para individuos con un DAP ≥ 10 cm. Las curvas se realizaron de dos formas: primero, construyendo las curvas especies-área, usando las áreas asociadas con los tamaños de cuadrante arriba mencionados; y segundo, empleando el número promedio de individuos referido a cada tamaño de cuadrante (Gotelli & Colwell, 2001). Para los cálculos se empleó el programa EstimateS versión 7.5.1 (Copyright R. K. Colwell, 2005), opción muestra sin reemplazamiento, con 50 iteraciones para cada tamaño de cuadrante. Estimadores de diversidad

Para caracterizar la diversidad se empleó el índice de Alfa de Fisher (Fisher *et al.*, 1943), el cual está dado por:

$$S = \alpha * \ln*(1 + N/\alpha)$$

Donde:

S = Número de especies

N = Número de individuos

α = Parámetro



Aparentemente todo es homogéneo

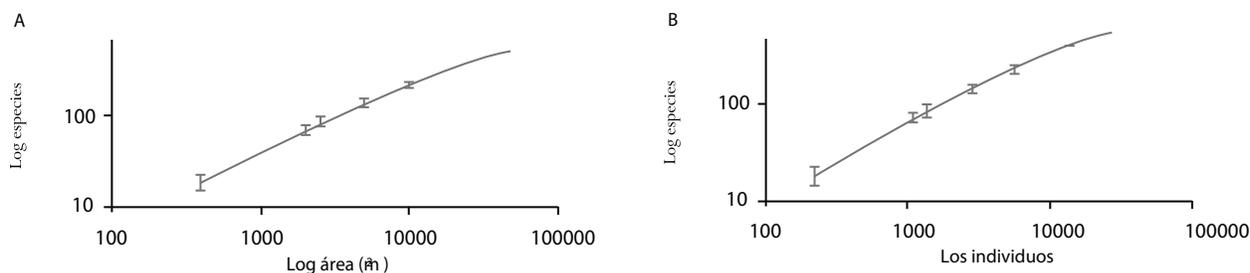


FIGURA 2. CURVAS ESPECIES-ÁREA Y ESPECIES-INDIVIDUOS EN ESCALA LOGARÍTMICA PARA 5 HA Y PARA UNA CATEGORÍA DE TAMAÑO. LOS GRÁFICOS A Y B CORRESPONDEN A LAS CURVAS DE ACUMULACIÓN CON BASE EN LOS PROMEDIOS ACUMULADOS DE LAS ESPECIES E INDIVIDUOS POR CUADRANTES DE 20 X 20, 50 X 50, 50 X 100, 100 X 100, 100 X 250 Y 100 X 500. EN CADA PUNTO SE MUESTRAN LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR CORRESPONDIENTES A CADA CATEGORÍA DE TAMAÑO.

El Alfa de Fisher provee una medida de la riqueza de especies, la cual es robusta a la variación en el número de individuos (Condit *et al.*, 1996). El ajuste y cálculo del parámetro alfa se obtiene por el método de Newton (Condit *et al.*, 1996; Leigh & Loo de Lao, 2000). Se analizó el patrón de cambio en la diversidad con respecto al número de individuos, usando el programa EstimateS versión 7.5.1. Una vez calculado el índice, para estimar el número total de especies esperado a tamaños de parcela más grandes y en todo el parque en general, se usó el valor obtenido del Alfa de Fisher para mil individuos (Condit *et al.*, 1996, 2004).

RESULTADOS

Curvas especies-área y especies individuos

En ninguno de los casos, ni con respecto al área ni con respecto al número de individuos, se visualizó ninguna tendencia a la asíntota. En ambos casos, las curvas especies-área y especies-individuos en escala logarítmica fueron casi lineales con una leve concavidad hacia abajo (Figuras 2A y 2B). De esta manera,

se concluye que aún se requiere ampliar el inventario para obtener una muestra representativa de la comunidad local (Tabla 1).

Alfa de Fisher

La diversidad, medida por el Alfa de Fisher, incrementó con el número de individuos a tasas más altas en muestras menores a los 1.000 individuos; a partir de los 2.000 individuos muestra una clara tendencia a la asíntota (Figura 3). El valor promedio por hectárea del Alfa de Fisher (137,2) fue similar a los reportados para los bosques más diversos del mundo (Tabla 2).

El valor observado del Alfa de Fisher para las primeras 5 ha fue de 195,84 (2.797 individuos). El valor utilizado para las extrapolaciones, el cual corresponde al valor para 1.000 individuos (siguiendo a Condit *et al.*, 1996), fue de 179,19. Según este valor, el número de especies estimado para las primeras 10-ha, 25-ha, y las 27,970-ha de TF que componen el PNN Amacayacu fue de 617, 775 y 2.085 especies arbóreas con más de 10-cm de DAP, respectivamente.

TABLA 1. TABLA DE ACUMULACIÓN DE ESPECIES Y DE INDIVIDUOS A MEDIDA QUE AUMENTO EL ÁREA DE MUESTREO, Y SUS RESPECTIVAS DESVIACIONES ESTÁNDAR PARA CADA UNA DE LOS TAMAÑOS DE CUADRANTE.

Tamaño	Area	Especies	Individuos
20x20	400	19 + 4.3	22 + 5.3
20x100	2000	71 + 7.2	112 + 16.8
50x50	2500	85 + 10.2	140 + 16.1
50x100	5000	141 + 15.4	280 + 28.0
100x100	10000	224 + 23.8	559 + 45.8
100x250	25000	378 + 6.4	1399 + 191.6
100x500	50000	534	2797

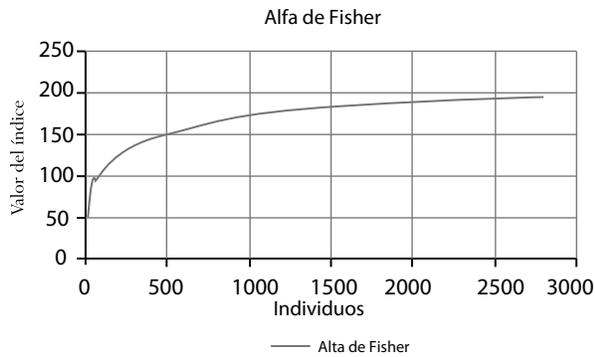


FIGURA 3. VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE DIVERSIDAD ALFA DE FISHER CON EL NÚMERO DE INDIVIDUOS. EL VALOR DEL ÍNDICE PARA EL TOTAL DE INDIVIDUOS (2797) PARA LAS 5 HA FUE DE 195,84.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio postulan los bosques de TF de Amacayacu como uno de los más diversos del mundo en lo que respecta al componente arbóreo. El número promedio de 220 sp/ha reportadas en las cinco primeras hectáreas, aunque levemente menores a los valores reportados en Yasuní, representan una diversidad similar, ya que la densidad de individuos en Amacayacu (aproximadamente 500 ind./ha) es menor a la reportada para este bosque de la Amazonia ecuatoriana (Condit *et al.*, 2004). Se confirma, por tanto, que la alta diversidad arbórea no es una característica exclusiva del piedemonte Andino (Gentry, 1988) y que alrededor del cauce del río Amazonas, en la parte sur del hemisferio a unos 5° de latitud, existe un

corredor donde ésta se magnifica (Ter Steege *et al.*, 2003; Duque *et al.*, 2009).

La falta de existencia de una asíntota en los modelos especies-área y especies-individuos es prueba adicional de la alta riqueza de especies a escala local. Esta característica refleja, además, el submuestreo de la diversidad alfa y la necesidad de tamaños de muestra más grandes a los aquí utilizados (Condit *et al.*, 1996, 2005), para poder caracterizar mejor la diversidad natural de estos bosques amazónicos. Debido a que los modelos en escala logarítmica (log-log) no fueron completamente lineales cuando se consideró la relación especies-individuos, la posibilidad de entender mejor la tendencia de la riqueza de especies a escalas más grandes se hace imposible por medio de esta herramienta (Rosenzweig, 1995).

El Alfa de Fisher, similar a lo reportado para otros bosques tropicales (Condit *et al.*, 1996, 2005; López & Duque, 2010), aparece como una herramienta de muy alta utilidad para realizar extrapolaciones y entender mejor la diversidad regional con base en la diversidad local. En este estudio, por ejemplo, para las primeras 10-ha se estimó un total de 617 sp; a la fecha de escribir este reporte recién se conoció que el número real es de aproximadamente 670, pudiendo ser un poco menos debido a la incertidumbre asociada con algunas morfoespecies. De esta manera, puede considerarse que la estimación fue bastante buena, siendo incluso un poco conservadora, lo cual resulta mejor cuando

TABLA 2. DIFERENCIAS EN NÚMERO DE INDIVIDUOS, VALOR ALFA DE FISHER Y NÚMERO DE ESPECIES ENTRE PARCELAS DE LA RED DE MEGAPARCELAS ASOCIADAS AL CTFS. PARA ÁREAS DE 1 HA, 25 HA Y 50 HA. N: NÚMERO DE INDIVIDUOS. α : ALFA DE FISHER. S: NÚMERO DE ESPECIES.

Lugar	1 ha			25 ha		
	N	α	S	N	A	S
Lambir, Sarawak	637	154	247	15916	193	851
Pasoh, Malay Península	531	125	206	13276	130	604
HKK, Thailand	438	21,3	65	10938	31,5	185
Mudumalai, South India	281	5,5	21	7024	8,7	58
Sinhnaraja, Sri Lanka	677	19,5	69	16937	25,7	167
Korup, Cameroon	492	30,8	87	12296	46,7	261
Yasuní, Ecuador	702	142	251	17546	178	820
La Planada, Colombia	586		88	14650		179
Amacayacu, Colombia	559	137,2	238	13985		862
Barro Colorado, Panamá	429	35,6	91	10728	36,1	206

se trata de estimar la diversidad. Con respecto al total de especies estimadas para TF en el PNN Amacayacu, asumiendo que las 2.085 especies arbóreas con más de 10 cm de DAP fuesen una cifra correcta, representaría por lo menos un 50% del total de especies arbóreas esperadas en toda la Amazonia colombiana, y aproximadamente un 17% del total en la cuenca Amazónica según los estimados de Hubbell *et al* (2008).

En síntesis, la función del PNN Amacayacu en cuanto a preservar y mantener la diversidad natural de los ecosistemas amazónicos se ve soportada por los resultados de este estudio. No obstante, con los datos de toda la parcela de 25-ha en su conjunto, que viene siendo establecida, se podrá con mayor eficiencia y precisión, calibrar el uso de esta herramienta para la estimación del número de especies.

AGRADECIMIENTOS

Al Center for Tropical Forest Science (CTFS) por su valiosa asesoría y colaboración.

BIBLIOGRAFÍA

- Colwell, R. K. EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 7.5.1 User's Guide and application. University Connecticut, Storrs, Connecticut, EEUU. 2005. 6 Julio 2007. [citado 1 Junio 2009]. Disponible en: <<http://purl.oclc.org/estimates>>.
- Condit, R. 1996. Defining and mapping vegetation types in mega-diverse tropical forests. *Trends in Ecology and Evolution* vol.11, no. 1, p. 4-5.
- Condit, R.; Hubbell, S. P.; Lafrankie, J. V.; Sukumar, R.; Manokaran, N.; Foster, R. & Ashton, P. 1996. Species-Area and Species-Individual relationships for tropical trees: A comparison of three 50 ha plots. *Journal of Ecology*. Vol. 4, p. 549-562.
- Condit, R. Tropical forest census plot. Springer-Verlag, Berlin, and R.G. Landes Company, Georgetown, Texas. 1998. 205 p.
- Condit, R.; R. B. Foster; S. P. Hubbell; R. Sukumar; E. G. Leigh; N. Manokaran; S. Loo De Lao; J.V. Lafrankie & P.S. Ashton. Assessing forest diversity on small plots: calibration using species-individual curves from 50 ha plots, In: DALLMEIER, F. & J.A. COMISKEY. *Forest Biodiversity Research, Monitoring and Modeling*. MAB Series UNESCO and Parthenon Publishing Group, Paris, Francia and Nue-



Diversidad florística del bosque amazónico

- vaYork, EEUU. 1998. vol. 20, p. 247-268.
- Condit, R., E.J. Leigh, S. Loo De Lao, S. Ashton, N. Brokaw, V.L. Nicholas, R. Bunyavejchwin, G.B. Chuyong, L. Co, H.S. Dattaraja, S. Davies, S. Esufali, C.E.N. Ewango, R. Foster, N. Gunatilleke, S. Gunatilleke, T. Hart, C. Hernandez, S.P. Hubbell, A. Itoh, R. John, M. Kanzaki, D. Kenfack, S. Kiratiprayoon, J. La Frankie, H.S. Lee, I. Liengola, J.R. Akana, N. Manokaran, H. Navarette, T. Ohkugo, R. Perez, N. Pongpattananurak, C. Samper, R. Sukumar, I.F. Fun, H.S. Suresh, S. Tan, D. Thomas, J. Thompson, M. Vallejo, G. Villa, R. Valencia, T. Yamakura & J.K. Zimmerman. 2004. Species-area relationships and diversity measures in the forest dynamics plots., En: Losos, E. & E.G. Leigh. Tropical forest diversity and dynamism: Findings from a large-scale plot network. Chicago Press (Chicago, Illinois, EEUU). p.79-89.
- Condit, R., P.S. Ashton, H. Balslev, S. Bunyavejchewin, G. Cuyong, L. Co, H.S. Dattaraja, S. Davies, S. Esufali, C.E.N. Ewango, R. Foster, S. Gunatilleke, N. Gunatilleke, C. Hernandez, S.P. Hubbell, R. John, D. Kenfack, S. Kiratiprayoon, P. Hall, L. Hua Seng, A. Itoh, I. Lafrankie, S. Liengola, E. Lao, E. Losos, J. Magard, N. Makana, J. Manokaran, H. Navarrete, S. Mohammed Nur, R. Sukumar, J. Svenning, D. Tan, S. Thomas, J. Thomspon, M. Vallejo, G. Villa, R. Valencia, T. Yamakura & J. Zimmerman. 2005. Tropical tree α -diversity: results from a worldwide network of large plots. *Biotropica*, vol. 55, p. 565-582.
- Duque, A., J.F. Phillips, P. Hildebrand, C.A. Posada, A. Prieto, A. Rudas, M. Suescún & P. Stevenson. 2009. Distance Decay of Tree Species Similarity in Protected Areas on Terra Firme Forests in Colombian Amazonia. *Biotropica*, vol. 41, p. 599-607.
- Fisher, R. A, Corbet, N., Williams, C. B., 1943. The relation between the number of species and the number of individuals in a random sample of an animal population. *Journal of Animal Ecology*, vol. 12, p. 48-58.
- Gentry, A.H. 1988a. Tree species richness of upper Amazonian forest. *Proceedings of the National Academy of Science (USA)*, vol. 85, p. 156-159.
- Gotelli, N. J. & Colwell, R. 2001. Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness, *Ecology Letters*, vol. 4, p. 379-391.
- He, F. & P. Legendre. 2002. Species diversity patterns derived from species-area models. *Ecology*, vol 83, p. 1185-1198.
- He, F., James, V., La Frankie H.S. & BO SONG. 2002. Scale dependence of tree abundance and richness in a tropical rain forest, Malaysia. *Landscape Ecology*, vol.17, p. 559-568.
- Holdridge L. *Ecología basada en Zonas de Vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 1978. p. 216.
- Hubbell S., He F., Condit R., Borda-De-Água L., Kellner J. Y Ter Steege H. 2008. How Many Tree Species Are There in the Amazon and How Many of Them Will Go Extinct?. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol 105, n°. 1, p. 11498-11504.
- Leigh, E. G & Loo De Lao, S. 2000. Fisher's alpha: measuring tree diversity. *Newsletter of Center for Tropical Forest Science (CTFS)*, p. 6-7.
- López, W. & A. Duque. 2010. Patrones de diversidad alfa en tres fragmentos de bosques montanos en la región norte de los Andes, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, vol. 58, n°. 1, p. 483-498.
- Pimm, S. L., Russell, G. J., Gittleman, J. L. & Brooks, T. M. 1995. The future of biodiversity. *Science* vol. 269, p.347-350.
- Rosenzweig, M.L. *Species diversity in space and time*. Universidad de Cambridge, Cambridge, Cambridgeshire, U.K. 1995. 460 p.
- Rudas, A & Prieto, A. C. 1998. Análisis florístico del parque Nacional Natural Amacayacu e Isla Mocagua, Amazonas (Colombia). *Caldasia*, vol. 20, n°. 2, p. 142-172.
- Ter Steege H., N. Pitman, D. Sabatier, H. Castellanos, P. Van Der Hout, D.C. Daly, M. Silveira, O. Phillips, R. Vasquez, T. Van Andel, J. Duivenvoorden, A. De Oliveira, R. Ek, R. Lilwah, R. Thomas, J. Van Essen, C. Baider, P. Maas, S. Mori, J. Terborgh, P. Nuñez, H. Mogollón Y W. Morawetz. 2003. A spatial model of tree α -diversity and tree density for the Amazon. *Biodiversity and Conservation*, vol. 12, p. 2255-2277.
- Valencia R, Foster Rb, Villa G, Condit R, Svenning Je, Hernández C, Romoleroux K, Losos E, Magard E, Balslev H. 2004. Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, vol. 92, n°. 2, p. 214-229.