

Patrones de Ecología Numérica Descritos por la Familia de Plantas Fabaceae Mimosoideae en la Isla Barro Colorado, Cuenca del Mar Caribe.

Patterns of Numerical Ecology Described by Plants Family Fabaceae Mimosoideae in Barro Colorado Island, Caribbean Sea Basin.

Welifer Junior Lebron Vicente

Estudiante de Ciencias Geográficas, Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)

Las fabáceas son plantas de amplia distribución terrestre, sus características y propiedades las hacen importantes en diversos campos de la ciencia médica, la industria alimenticia y textil. Los métodos de análisis biogeográficos permiten cuantificar el estado de esta familia, brindando información valiosa para comprender las formas de asociación, agrupamiento, proliferación y decaimiento de acuerdo a variables ambientales. En la isla Barro Colorado el clado filogenético mimosoide presente no exhibe comportamientos que favorezcan variables edáficas y geomorfológicas específicas de manera marcada.

Keywords: Ecología Numérica, BCI, Análisis Forestal, Lenguaje R

1 Introducción

El análisis de biodiversidad forestal viabiliza la obtención de información sobre el comportamiento de las especies en su hábitat, los efectos de cambios geoestacionarios, y las probables consecuencias de actividades antrópicas en el ciclo vital de los bosques; cuya función en el caso de los tropicales puede ser productiva (madera, fibra, leña, productos no maderables); ambiental (regulación del clima, reserva de biodiversidad, conservación de suelos y agua, etc.); y social (subsistencia de poblamientos humanos locales y su cultura) (Montagnini, Jordan, & others, 2005).

La isla Barro Colorado (BCI), de coordenadas [9° 9' 0"N, 79° 51' 0" W], es una plataforma basáltica miocénica sobre la que descansa un bosque tropical primario compuesto por 305 especies arbóreas (Condit et al., 1999). Fue el emplazamiento de ocho censos forestales realizados por el Smithsonian Tropical Research Institute entre 1981 y 2015, donde la subfamilia *Fabaceae Mimosoideae* representó el 5.9% de las especies registradas en la parcela de 50 hectáreas delimitada en 1980.

El registro forestal de BCI forma parte de una serie de parcelas permanentes delimitadas en distintas latitudes y longitudes, pero dentro de la zona tropical. Estas parcelas poseen diferencias climáticas específicas con el objetivo de contabilizar, supervisar y medir variables demográficas que viabilicen realizar comparaciones atendiendo a cuestionamientos científicos, registro detallado del comportamiento en ecología vegetal o problemáticas resultantes de la intervención humana en el equilibrio natural (Condit, 1998).

Las fabáceas concentran su diversidad en la franja tropical y subtropical, aunque se encuentran ampliamente distribuidas por la práctica totalidad de climas terrestres. Están presentes en zonas árticas, litoral costero, ambientes alpinos, bosque lluvioso, bosque estacional, sabanas, bosque

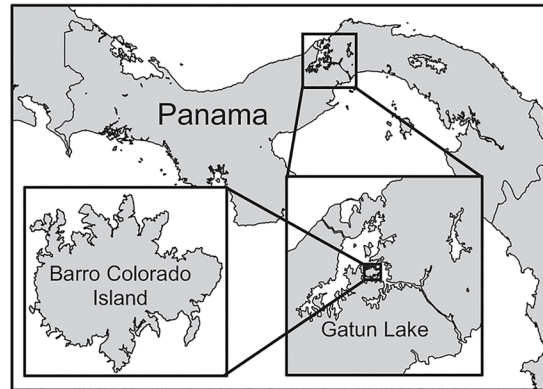


Figure 1: Isla Barro Colorado, Panamá (Baldeck et al., 2014).

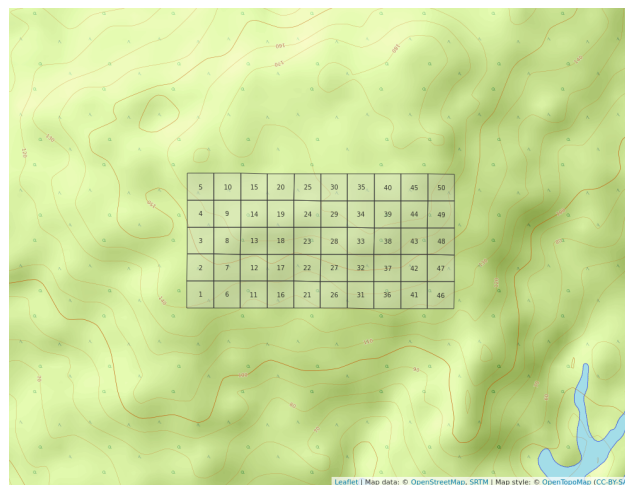


Figure 2: Área del censo forestal, Barro Colorado Island (1981-2015).

seco, desiertos áridos, pantanos y manglares. Poseen características especializadas que las hacen vitales para el equilibrio ecológico y para la supervivencia del ser humano. Asimismo, el 88% de las especies de fabáceas pueden formar nódulos con bacterias (rhizobia) para fijar el N₂ en la atmósfera mediante asociación simbiótica, fisiología rica en proteínas, etc.; mientras que sus semillas son empleadas para tratar células cancerígenas, sus componentes químicos las hacen esenciales para diversos tipos de industrias, y el grano de las leguminosas representa el 33% del nitrógeno necesario en la dieta del ser humano (Saikia, Nag, Anurag, Chatterjee, & Khan, 2020). Especificando, la subfamilia *Mimosoideae* dentro del clado filogenético mimosoide es sumamente variable, estando compuesta principalmente por árboles y arbustos de flores simétricas cigomorfas con pétalos valvados, a la vez que sus especímenes tienen un gran número de estambres prominentes (Hasanuzzaman, Araújo, & Gill, 2020). En BCI se encuentran 18 de estas especies.

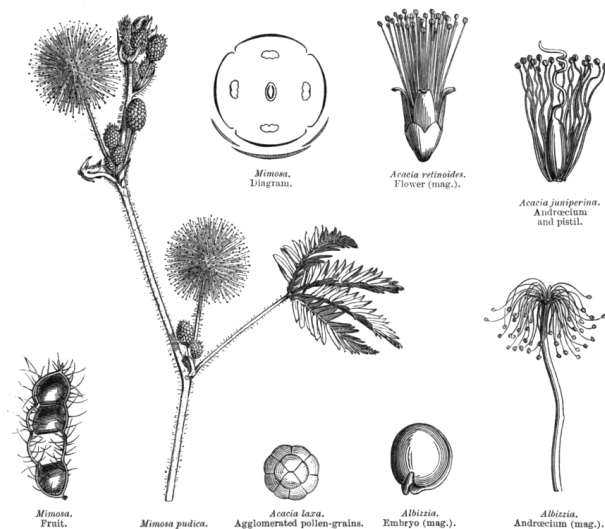


Figure 3: Grabado de fabaceas (Universiad de Toronto).

Atendiendo a la flexibilidad en la distribución de las fabáceas, su importancia económica, y social; se busca entender qué factores ambientales intervienen en la proliferación, agrupamiento o decaimiento de sus poblaciones en bosques tropicales que comparten características con los hallados en República Dominicana, en esta ocasión tomando la data cincuentenaria recolectada y provista por The Center for Tropical Forest Science en BCI. En ese sentido, la ecología numérica es el campo de estudio que brinda las técnicas, índices, y herramientas necesarias para obtener conclusiones a partir de data forestal, animal, y biotopo. R es un software de código abierto y ambiente de programación que brinda una amplia variedad de facilidades para el manejo, creación, y visualización gráfica de ciencia de datos, resultando ideal para este campo de estudio (Venables, Smith, Team, & others, 2009).

Los métodos de análisis en ecología numérica han incrementado exponencialmente a partir de la década 1950, desarrollándose índices, estimadores y algoritmos que permiten realizar transformaciones cualitativas y cuantitativas para inferir y obtener precisión con menores probabilidades de sesgo o en ausencia del mismo. La obtención de información relativa al grado de asociación, ordenamiento, diversidad, agrupamiento, entre otros; es debida a estas técnicas. (ver tabla 1)

Table 1: Métodos de análisis en ecología numérica empleados (Moreno, 2001).

...

Campo a cuantificar	Técnica métrica
Asociación	<ul style="list-style-type: none"> • Modo Q • Modo R • Transformación de matriz <i>Chord</i> • Transformación de matriz <i>Ji-cuadrado</i> • Transformación de matriz <i>Chi</i> • <i>Hellinger</i> • Índices de <i>Jaccard</i> • Índice de <i>correlación de Sperman</i>
Agrupamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Criterios de enlace: explican la disimilitud de conjuntos como una función de las distancias dos a dos entre observaciones de los conjuntos.
Ordenamiento	<ul style="list-style-type: none"> • ANOVA (análisis de la varianza). • Kruskal-Wallis: es el equivalente al análisis de la varianza en los estimadores no paramétricos, se diferencia en que no asume "normalidad" en los datos.
Diversidad	<ul style="list-style-type: none"> • Índice de Renyi: • Índice <i>Shannon</i>: mide el grado promedio de incertidumbre en predecir a que especie pertenecerá un individuo escogido al azar de una colección. • Números de diversidad de <i>Hill</i>: esta serie de números permite calcular la cantidad efectiva de especies en una muestra, es decir, una medida del número de especies cuando cada especie es ponderada por su abundancia relativa. • Equidad de <i>Pielou</i>: mide la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada. • Estimador de <i>Chao</i>: basado en la incidencia de especies en muestras y predice el número de especies en un área con base en el número de especies raras que se encuentran exactamente en una y dos muestras. • Estimador <i>bootstrap</i>: consiste en la proporción de unidades de muestreo que tiene cada especie. • Estimador <i>Jackknife1</i> (primer orden): basado en el número de especies que ocurren en solo una muestra, funciona como técnica para reducir el sesgo estimado. • Estimador <i>Jackknife2</i> (segundo orden): consiste en el número de especies que existen en una muestra así como el número de especies que ocurren exactamente en dos muestras.

Figure 4:

2 Metodología

Obtenida la data censal de Barro Colorado, se empleó R para realizar análisis estadísticos, gráficos, matrices, y mapas a la matriz de la familia *Fabaceae mimosoideae* partiendo del repositorio **Scripts de análisis BCI** (Batlle, 2020).

La creación de los utiles necesarios para los análisis fue posible mediante el empleo de los paquetes *vegan*, *tydiverse*, y *sf* para extraer la familia *Fabaceae Mimosoideae* de la data censal, obtener las estadísticas, gráficos lineales y diagramas de cajas. A la vez que, mediante *mapview* se crearon, proyectaron y almacenaron los mapas; con *RColorBrewer* se para obtuvo una gama de colores más amplia en los gráficos y mapas; y con *broom* se visualizaron las matrices de distancia. Otros paquetes empleados fueron *magrittr*, *plyr*, *vegetarian*.

Podría crear una tabla para explicar brevemente el uso dado a cada paquete

La caracterización geomorfológica se elaboró a partir del algoritmo *r.geomorphons* siguiendo el modelo de Jasiewicz & Stepinski (2013). (Ver figuras 5 y 6)

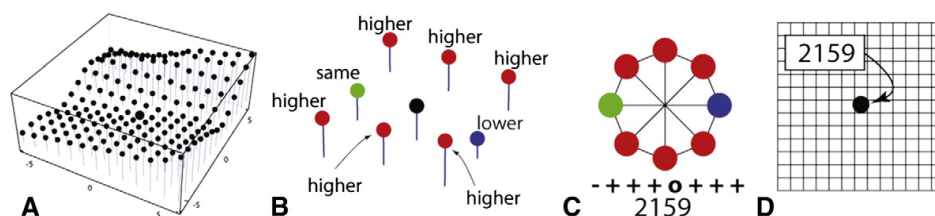


Figure 5: Modelo desarrollado por Jasiewicz & Stepinski (2013) para la caracterización del relieve.

Diversos estudios fueron tomados en cuenta para la clasificación de hábitats, se emplearon 5 de las categorías definidas por Harms, Condit, Hubbell, & Foster (2001) partiendo del resumen y análisis de la data compilada en 16 años, donde fueron tomados en cuenta árboles iguales o

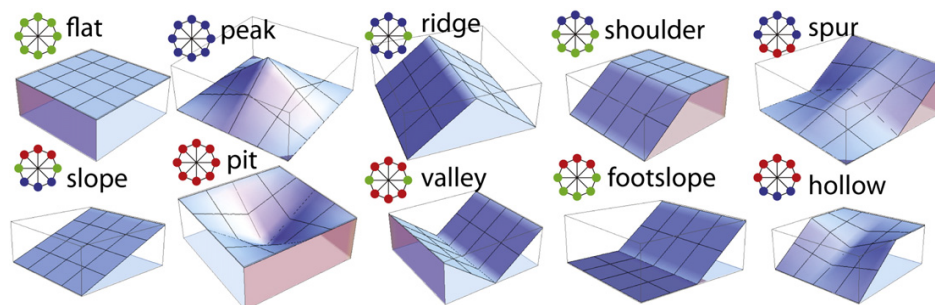


Figure 6: Ejemplos de las variantes de relieve más comunes obtenidas a través del algoritmo (ibidem).

mayores de 1 cm de diámetro a la altura del pecho. (Ver tabla 2)

Table 2: Clasificación de hábitats, parcela permanente BCI (Harms et al., 2001).

Hábitat	Pendiente (grados)	Elevación (metros)
Bosque adulto - Meseta baja	<7	<152
Bosque adulto - Meseta alta	<7	= o >152
Bosque adulto - Pendiente	= o >7	Todas
Bosque adulto - Área pantanosa	Todas	Todas
Bosque joven	Todas	Todas

Mapas de ubicación, abundancia de individuos, riqueza de especies, agrupamiento de parcelas, pH, nitrógeno y otras variables presentes en el relieve, clima, y edafología del lugar se emplearon para determinar patrones asociativos entre las especies.

La determinación de la asociación interespecífica y de sitios muestrales fue realizada mediante los métodos R y Q respectivamente. El modo Q se obtuvo con la métrica de distancia euclídea o similaridad de Jaccard, verificando la paradoja de orlóci (1978); transformando la matriz en una de cuerdas (*chord*); *ji*-cuadrado; y *Hellinger*. A la vez, el modo R se calculó con el índice de correlación de Pearson aplicando la transformación de *chi* para corregir alteraciones producidas por outliers en los datos, convirtiendo a binaria (presencia/ausencia) la matriz de comunidad transpuesta para calcular distancias entre especies con la similaridad de Jaccard y el índice *rho* de Sperman. Por otro parte, el agrupamiento jerárquico fue analizado mediante tres técnicas o criterios de enlace, donde fueron seleccionados los criterios enlace simple y enlace promedio de varianza mínima tomando en cuenta métodos de regresión lineal [WARD], siendo la muestra dividida en tres grupos en este último. (Ver tabla 2)

Table 3: Clasificación de los criterios de enlace (Harms et al., 2001).

Técnica o criterio de enlace	Descripción	Método de ejecución
Enlace simple	Usa la mayor similaridad como métrica para agrupar pares de objetos en forma aglomerativa sucesiva, siendo el criterio calcular el vecino más próximo.	Se transforma la matriz en "normalizada", entonces se calcula la distancia euclídea. Por último se aplica el método "simple" a través de la función <code>hclust</code> .
Enlace completo	Se fundamenta en el cálculo de la distancia más lejana entre los pares de objetos.	Se aplica el método "complete" de la función <code>hclust</code> a una matriz normalizada y con similaridad de Jaccard.
Enlace promedio	Pondera la media entre las distancias mínimas y máximas, el resultado depende del tipo de "promedio" que se calcule: <ul style="list-style-type: none"> • UPGMA (Unweighted Pair Group Method with Arithmetic mean). • WPGMA (Weighted Pair Group Method with Arithmetic mean). • UPGMC (Unweighted Pair Group Method using Centroids). • WPGMC (Weighted Pair Group Method using Centroids). • WARD. 	Mismo procedimiento, pero se sustituye el método por "average" o "ward.D2"

Se realizó una correlación entre los tres grupos determinados para WARD y las variables ambientales para definir posibles asociaciones entre estos o la existencia de un grupo que se decante

Para obtener la estimación de riqueza de acuerdo a la diversidad de especies en la parcela se emplearon los estimadores no paramétricos o de “distribución libre”, entre estos están Chao1, Bootstrap, y los Jackknife1 de primer y segundo orden.

...

3 Resultados

La parcela madre en BCI posee 3847 individuos de la familia *Fabaceae mimosoideae* agrupados en 18 especies distribuidas de forma aleatoria en 50 sitios de 1ha cada uno. La especie más abundante es *Inga marginata* [767], seguida de cerca por *Inga umbellifera* [765]; mientras que la más escasa es *Cojoba rufescens* [2], seguida de *Inga oerstediana* [4]. La abundancia específica acorde a una organización ascendente por número de individuos presenta una mediana de 57 individuos [*Inga punctata* e *Inga laurina*], siendo la mitad más pobre de especies el equivalente a un 5.82% [224] y la mitad más presente el 94.18% [3623]. La riqueza de especies por cuadrante evidencia una distribución también desproporcional, el C26 presenta la riqueza más débil [5] y el C30 la más fuerte [13]. No obstante, aunque no existe relación directa entre la riqueza y la abundancia por cuadrante, en C26 coincide y en algunos otros cuadros puede existir cierta aproximación.

(ver tabla 2 y figura 7)

Table 2: Abundancia por especie de la familia *Fabaceae-Mimosoideae*.

Latin	n
<i>Inga marginata</i>	767
<i>Inga umbellifera</i>	765
<i>Inga acuminata</i>	606
<i>Inga nobilis</i>	557
<i>Inga goldmanii</i>	297
<i>Inga thibaudiana</i>	232
<i>Inga sapindoides</i>	197
<i>Inga pezizifera</i>	145
<i>Inga laurina</i>	57
<i>Inga punctata</i>	57
<i>Inga cocleensis</i>	54
<i>Acacia melanoceras</i>	48
<i>Inga spectabilis</i>	20
<i>Abarema macradenia</i>	19
<i>Enterolobium schomburgkii</i>	12
<i>Inga ruiziana</i>	8
<i>Inga oerstediana</i>	4
<i>Cojoba rufescens</i>	2

El terreno eminentemente describe una geomorfología en vertiente, siendo esta característica la más destacada en el 88% de los C 1Ha; en tanto que el 12% restante describe una geomorfología donde predomina el relieve llano. La parcela madre está compuesta en un 52% por bosque adulto en meseta baja distribuido ampliamente, un 24% por bosque adulto en pendiente con presencia marcada en las parcelas [C41-C45], un 16% por bosque adulto en meseta alta concentrado en las

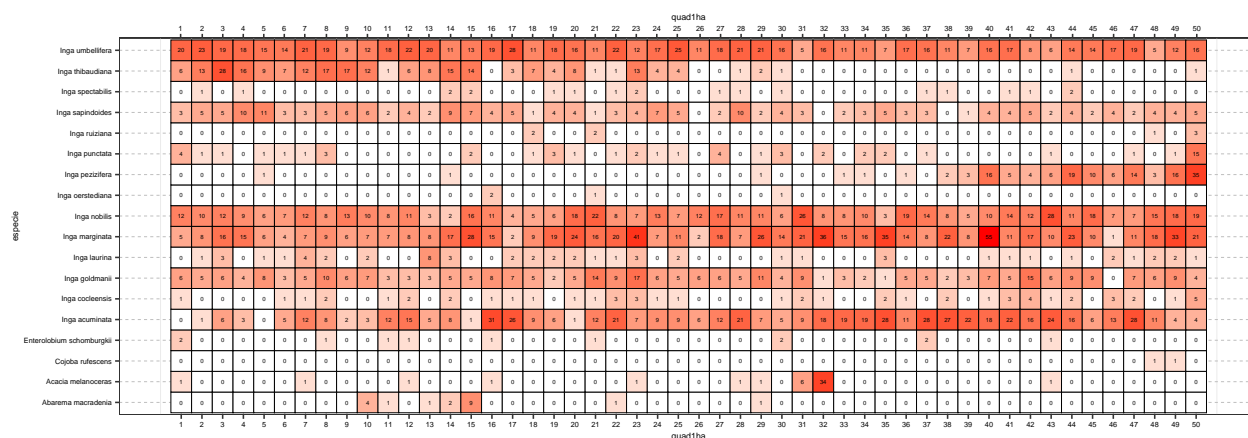


Figure 7: Abundancia por especie por quadrat

parcelas [C32-C34; C37-C40], mientras que el 8% restante es hábitat pantanoso y bosque joven en forma equitativa. No parece existir una relación directa entre la morfología del espacio y un determinado hábitat, exceptuando el bosque joven que se encuentra tanto en llanura como en vertiente de forma considerable. En general, se percibe un leve aumento de la riqueza específica a medida que aumenta la abundancia de individuos; destacando la abundante riqueza de especies en el hábitat pantanoso, su pobreza en el bosque adulto en zona alta, la abundancia marcada el bosque adulto en zona baja y su riqueza equilibrada. (Ver figura 8).

El grado de asociación según la similaridad de Jaccard acorde a la abundancia de especies por cuadro con matriz transformada *Hellinger* expone la existencia de clústers sumamente semejantes limitados por los sitios C28-C33; C33-C40; C24-C2; C8-C10. Estos sitios comparten un 75% o más de las especies de acuerdo con la matriz ordenada en función de la relación de proximidad (ver mapa de calor superior 9). Por otra parte, la presencia de variables edáficas como minerales y otros elementos está asociada a la abundancia de especies en el clúster formado por los sitios C1-C9 de la matriz ordenada en función del id de lugar, pero además de esta relación no hay indicios de una dependencia entre estas variables que evidencie asociación alguna (ver mapa de calor inferior 9). De igual forma, no existe una relación de asociación entre las variables mixtas "hábitat, quebrada, heterogeneidad ambiental" y la distribución de especies por cuadros. (Ver figura \ref{fig:heat}).

La asociación interespecífica en función de la abundancia, como se observa en el mapa de calor 10, evidencia un grado de asociación muy amplio [75%-100%] en el clúster delimitado por *Inga lauriana* e *Inga marginata*, así como uno considerable en el macroclúster comprendido entre *Inga peizizifera* e *Inga spectabilis*. Es descrito un patrón similar por las especies en la matriz binaria (presencia/ausencia), donde se forma un clúster entre *Inga cocleensis* e *Inga laurina* que describe bastante coexistencia entre las especies [75%-100%], y un macroclúster entre *Inga peizizifera* e *Inga spectabilis* con cercanía considerable. En ese sentido, la matriz de correlación entre las variables "abundancia, riqueza, y composición del suelo", realizada mediante el índice *rho* de sperman, corrobora lo observado en los mapas de calor anteriores acerca del escaso grado de asociación entre dichas variables. Tampoco se observa relación entre las dos primeras y las variables relativas a la geomorfología del lugar. (Ver figura 11)

Acorde al ordenamiento por enlace simple, los cuadros 32, 50 y 43 se separan bastante de los demás, lo cual se corresponde con la abundancia y riqueza de especies en estos sitios comparada con los demás, siendo en C32 116 [tercera más alta] y 8 [tercil más pobre] respectivamente, por ejemplo. También se observan dos grupos definidos formados entre los sitios C22-C37 y C28-C7.

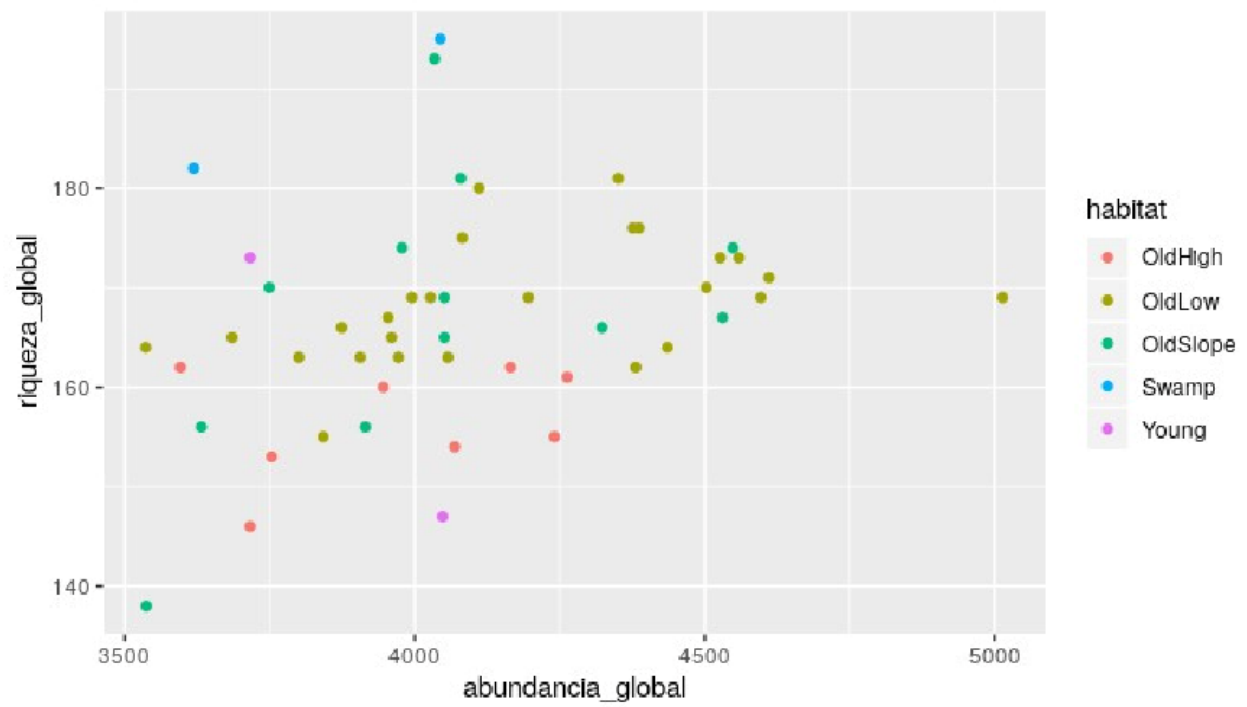
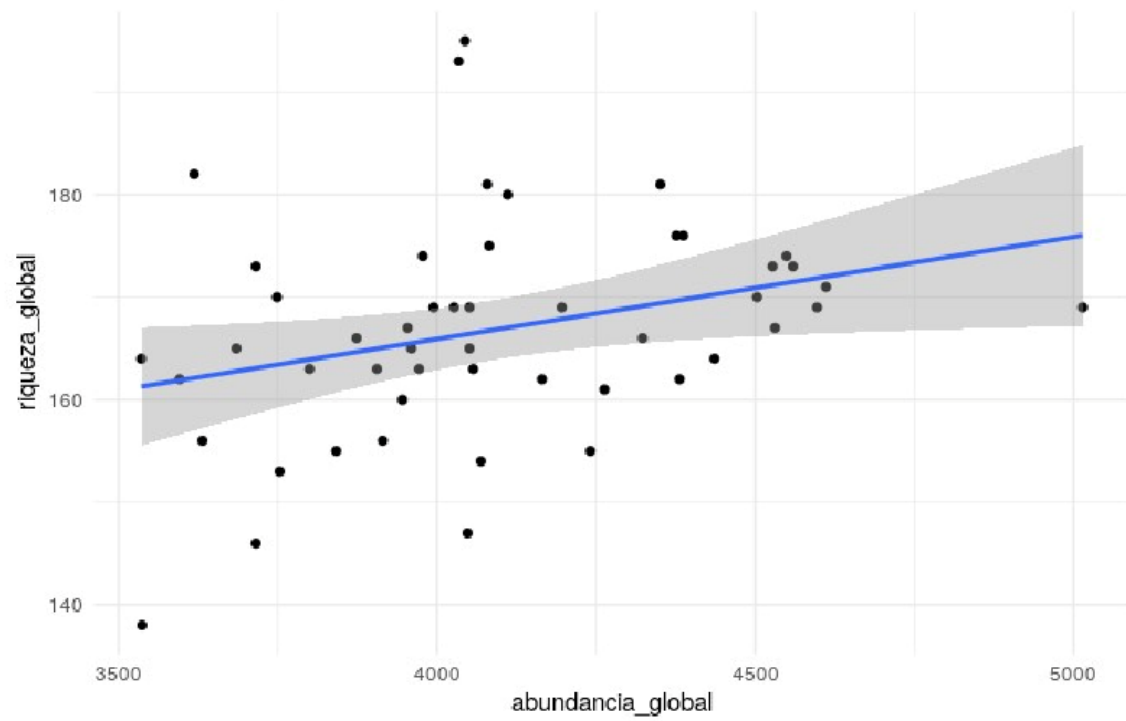


Figure 8: Distribución de sitios en función de su riqueza, abundancia, y hábitat dominante.

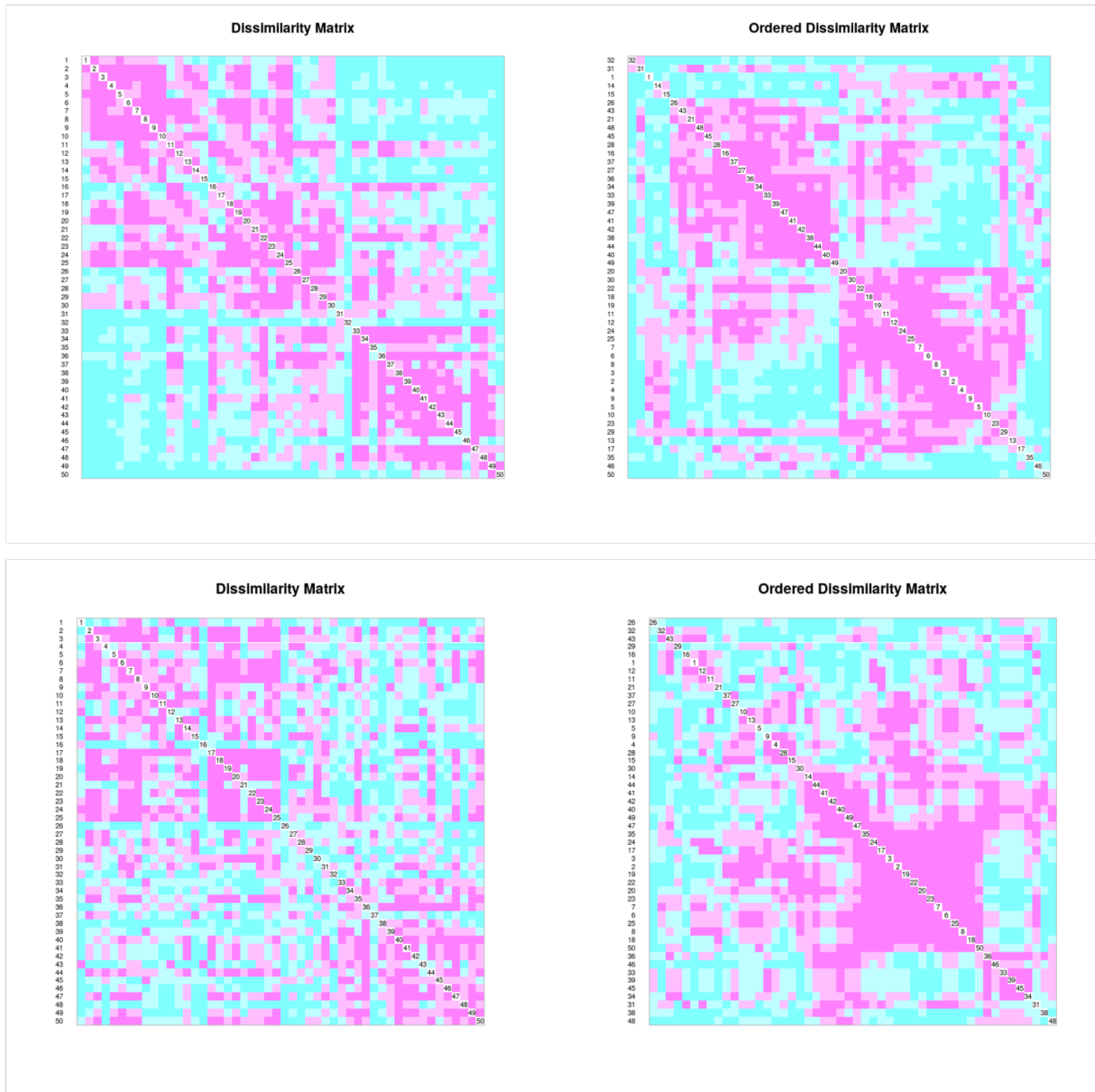


Figure 9: Mapas asociación de especies por abundancia en los sitios de muestreo (superior) y por asociación de variables ambientales y abundancia (inferior). El color azul fuerte representa “lejanía” y el rosado fuerte “proximidad”.

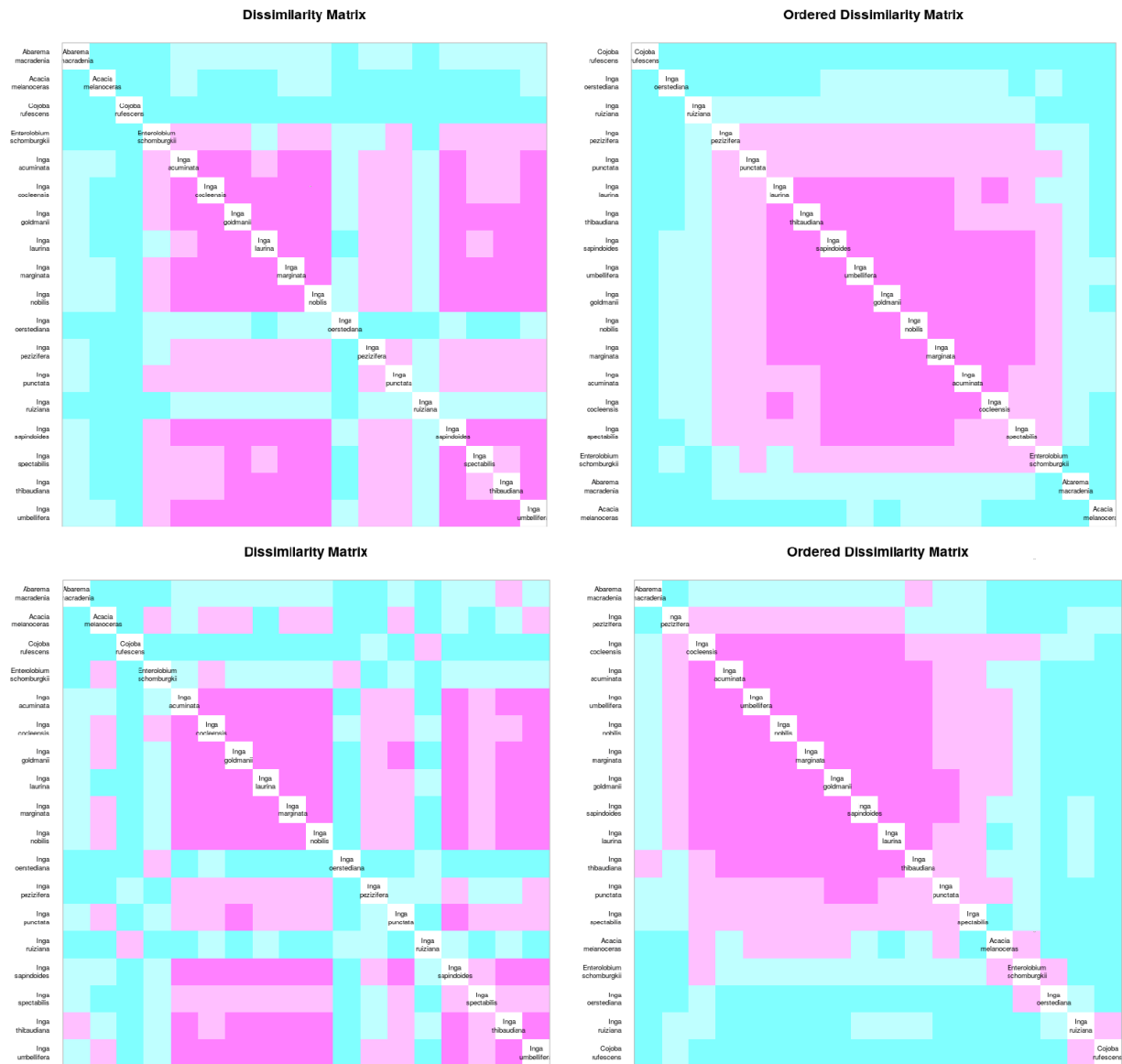


Figure 10: Mapas de calor, asociación entre especies en función de su abundancia (superior) y en función de su abundancia con matriz binaria “presencia/ausencia” (inferior).



Figure 11: Matrices de Sperman, asociación de especies en función de las variables edáficas (superior) y asociación de especies en función de las variables geomorfológicas (inferior) .

(Ver)

En el dendrograma de WARD se observa la presencia de tres grupos definidos entre los sitios C3-C7, C46-C34 y C27-C23; formados por 11, 18 y 21 sitios respectivamente. También pueden definirse cinco subgrupos menores más próximos entre sí: C3-C7 [sitios con abundancia y riqueza promedio], C46-C22, C27-C48, C50-C23 [citios con las mayores abundancias y riquezas, o al menos una de estas en forma de outlier] (ver figura13).Continuando con los tres primeros grupos WARD mencionados, en los diagramas de cajas para las variables ambientales se observa distancia que se acrecienta según se cambia de grupo, en orden ascendente, en las medianas respecto a las variables Boro, Hierro, Geomorfología en llanura, Potasio, Nitrógeno Mínimo, pH y zinc. Esta tendencia es también descrita en menor medida por las variables Calcio, Cobre, Heterogeneidad ambiental y Magnesio. En contraste, este patrón se invierte en las variables Aluminio y Geomorfología en vaguada. Por otra parte, el segundo grupo se decanta por la variable Fósforo, presentando números inferiores en Abundancia y Riqueza de especies, mientras que el primer y tercer grupo son bastante homogéneos en ese sentido.

En la matriz de correlación para determinar equidad se observan niveles de correlación bastante bajos para todas las variables ambientales, siendo las variables Boro, Fósforo, Nitrógeno y pH las que presentan niveles significativos respecto a los números de Hill y los índices de Shannon. Por otra parte, la variable “Riqueza global” presenta niveles determinantes para los índices anteriores, promediando un 73% de correlación colectivamente.

La riqueza de especies respecto a la diversidad de estas en la parcela se determinó en porcentajes aproximados a la riqueza real. Por otro lado, la diversidad beta describe una curva ascendente según aumenta el número de ordenamiento en Hill, llegando a superar el N0. Presentando un grado de dominancia mayor y una dependencia de la abundancia en la diversidad beta. Las especies que más contribuyen a la diversidad son *Inga acumiata*, *Inga marginata*, *Inga Pezizifera* e *Inga thibaudiana*; donde las dos primeras son de las especies más abundantes y por si solas representan el 35.7% de los individuos en la comunidad de las fabáceas. Por otra parte, los sitios que más contribuyen a la diversidad beta son C32 y C50. (Ver tabla 3)

Table 4: Estimadores de riqueza de especies.

Estimadores	Chao	Jackknife1	Jackknife2	Bootstrap	Real
	18 (100%)	18 (100%)	17.06 (105.5%)	18.19 (98.95%)	18

4 Discusión

11

La familia *Fabaceae mimosoideae* en BCI presenta niveles de asociación (coexistencia) sobre el 75% entre las especies *Inga laurina*, *Inga margitana*, *Inga thitaudiana*, *Inga sapindoides*, *Inga umbellifera*, *Inga goldimani* e *Inga nobilis*. Estas especies son las más abundantes de esta familia en BCI,

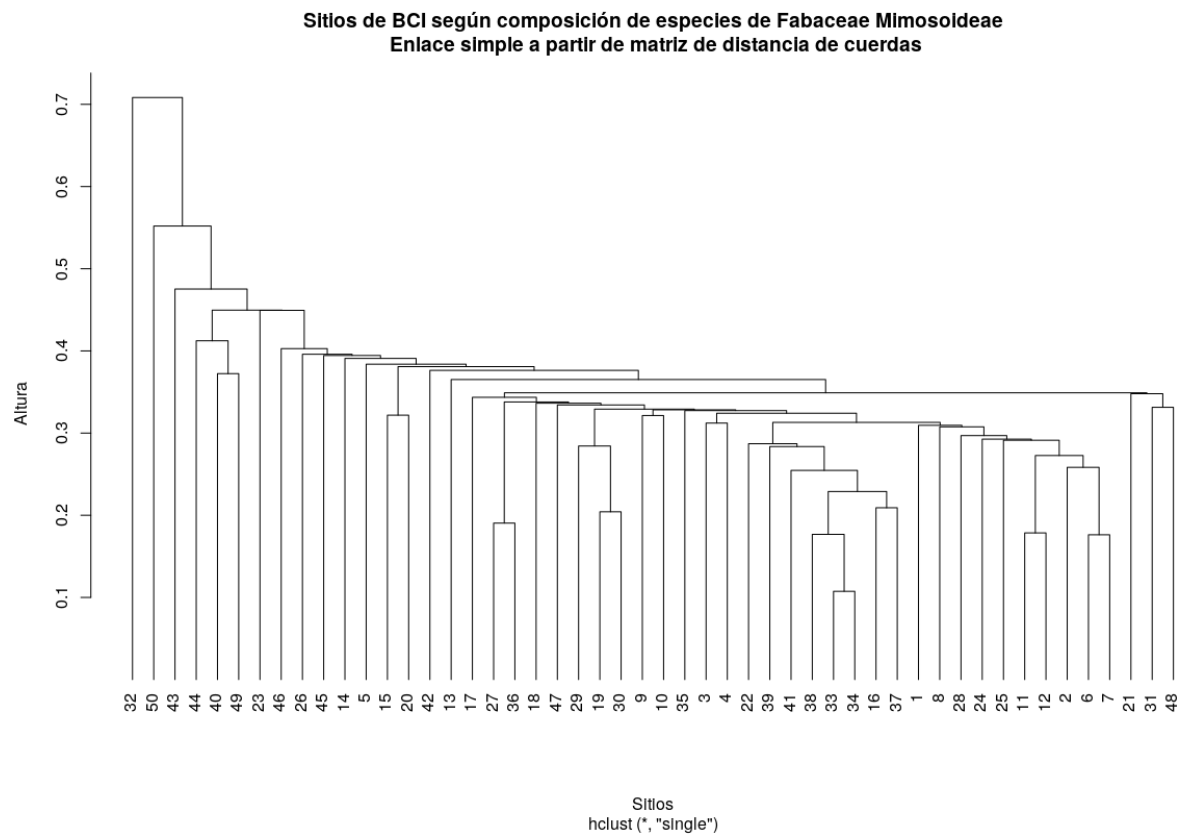


Figure 12: Dendrograma a partir del criterio enlace simple.

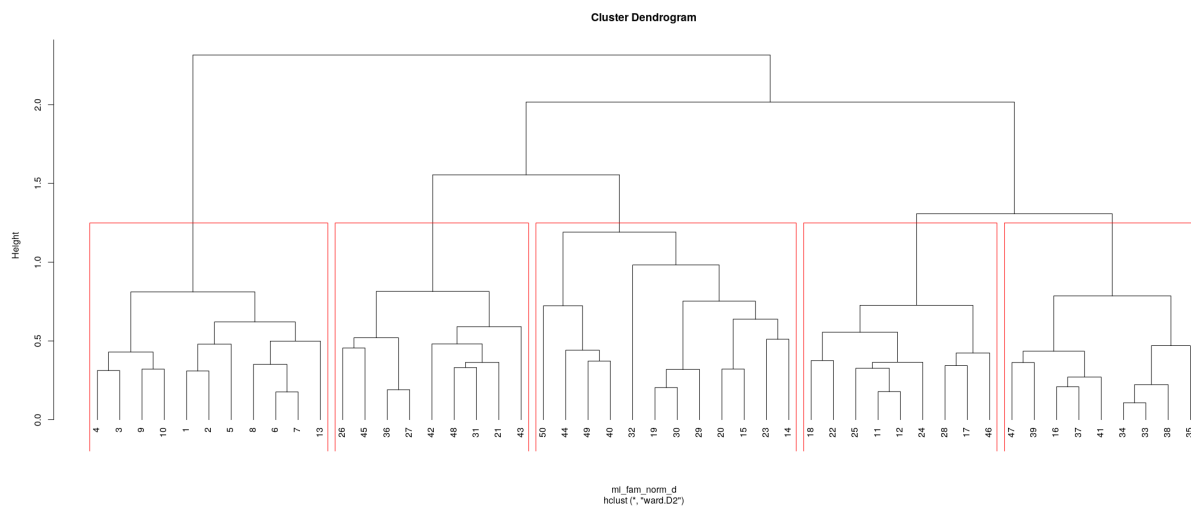


Figure 13: Dendrograma a partir del criterio enlace promedio (WARD).

La diversidad de las especies no está afectada de forma significativa por alguna variable, siendo la equidad poco significativa para todas las variables ambientales, exceptuando por la abundancia global que es la determinante de la diversidad en la muestra. En ese sentido, la riqueza las fabáceas respecto a la diversidad es bastante alta, teniendo porcentajes mayores al 98% en todos los índices calculados. Cuatro especies contribuyen significativamente a la diversidad: *Inga marginata*, *Inga acumiata*, *Inga thibaudiana* e *Inga Pezizifera*, todas ellas pertenecientes a la mitad más abundante de las especies.

5 Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al Ph.D José Ramón Martínez Battle, quien supervisó todo el proceso, brindó la asesoría y fuentes bibliográficas que sirvieron de base para la elaboración del estudio.

6 Información de soporte

...

7 Script reproducible

...

Baldeck, C., Asner, G., Martin, R., Anderson, C., Knapp, D., Kellner, J., & Wright, S. J. (2014). Operational tree species mapping in a diverse tropical forest with airborne imaging spectroscopy. *PloS one*, 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118403>

Battle, J. R. M. (2020). biogeografia-master/scripts-de-analisis-BCI: Long coding sessions (Version v0.0.0.9000). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4402362>

Condit, R. (1998). *Tropical forest census plots: Methods and results from barro colorado island, panama and a comparison with other plots*. Springer Science & Business Media.

Condit, R., Ashton, P. S., Manokaran, N., LaFrankie, J. V., Hubbell, S. P., & Foster, R. B. (1999). Dynamics of the forest communities at pasoh and barro colorado: Comparing two 50-ha plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 354(1391), 1739–1748.

Harms, K. E., Condit, R., Hubbell, S. P., & Foster, R. B. (2001). Habitat associations of trees and shrubs in a 50-ha neotropical forest plot. *Journal of Ecology*, 89(6), 947–959.

Hasanuzzaman, M., Araújo, S., & Gill, S. S. (2020). *The plant family fabaceae: Biology and physiological responses to environmental stresses*. Springer Nature.

Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147–156.

Montagnini, F., Jordan, C. F., & others. (2005). *Tropical forest ecology: The basis for conservation and management*. Springer Science & Business Media.

Moreno, C. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad* (Vol. 1).

Saikia, P., Nag, A., Anurag, S., Chatterjee, S., & Khan, M. L. (2020). Tropical legumes: Status, distribution, biology and importance. In *The plant family fabaceae* (pp. 27–41). Springer.

Venables, W. N., Smith, D. M., Team, R. D. C., & others. (2009). *An introduction to r*. Citeseer.