

Patrones de Ecología Numérica de Fabaceae-Mimosoideae en la Isla Barro Colorado, Panamá.

Patterns of Numerical Ecology of Fabaceae-Mimosoideae in Barro Colorado Island, Panama.

Welifer Junior Lebron Vicente

Domingo (UASD)

Estudiante de Ciencias Geográficas, Universidad Autónoma de Santo

Las fabáceas son plantas de amplia distribución terrestre y sus características las hacen importantes en diversos campos de la ciencia médica, la industria alimenticia y textil. La isla Barro Colorado posee un registro detallado de las especies de fabáceas en 50Ha, lo suficiente para comprender las características ecosistémicas que condicionan el desarrollo de esta familia en bosques tropicales. Se emplearon métodos de análisis biogeográficos mediante lenguaje R para cuantificar su estado, brindando información valiosa para definir las formas de asociación, agrupamiento y diversidad de acuerdo a variables ambientales; evidenciando que el clado filogenético mimosoide presente no exhibe patrones asociación entre variables edáficas y geomorfológicas específicas de manera marcada.

Keywords: Ecología Numérica, BCI, Fabaceae-Mimosoideae, Lenguaje R.

1 Introducción

El análisis de biodiversidad viabiliza la obtención de información sobre el comportamiento de las especies en su hábitat, los efectos de cambios ambientales, y las probables consecuencias de actividades antrópicas en el ciclo vital de los bosques y, consecuentemente, en sus funciones. La importancia de los bosques, especialmente los tropicales, radica precisamente en sus diversas funciones productivas (e.g. madera, fibra), ambientales (e.g. regulación del clima) y sociales (subsistencia humana, patrimonio cultural) (Montagnini, Jordan, & others, 2005).

Las fabáceas concentran su mayor 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 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 forman nódulos con bacterias (rhizobia) para fijar el N_2 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).

La isla Barro Colorado (9° 9' 0"N, 79° 51' 0"W), en lo adelante 'BCI', es una plataforma basáltica miocénica sobre la que descansa un bosque tropical primario compuesto por 305 es-

pecies arbóreas (Condit et al., 1999). Es 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.

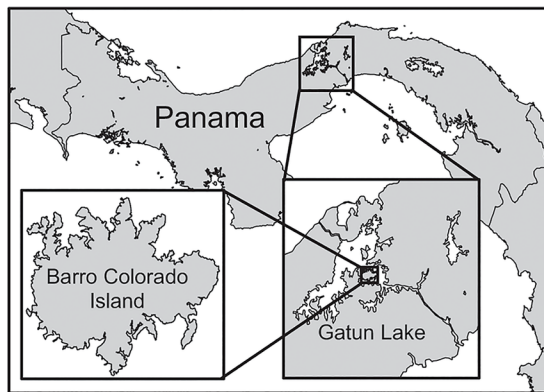


Figure 1: Isla Barro Colorado, Panamá (Baldeck et al., 2014).

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).

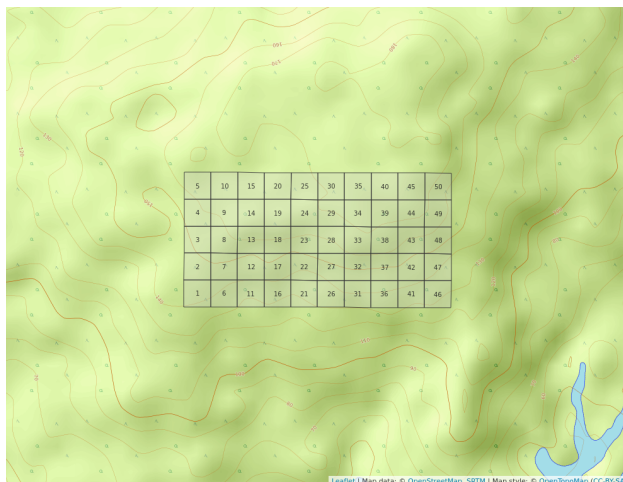


Figure 2: Área del censo forestal, Barro Colorado Island (1981-2015).

Atendiendo a la flexibilidad en la distribución de las fabáceas, su importancia económica, y social; en el presente estudio se responde a los niveles de asociación presentados por esta familia, la organización de los cuadros acorde a su composición de especies, y la probable influencia de variables ambientales en la descripción de patrones para estos propósitos en BCI. Además, otro objetivo es realizar una estimación de la riqueza de la familia, asumiendo un 85% de riqueza o más como una ‘buena representación’. La determinación de estos patrones de asociación, agrupamiento y diversidad servirán para comprender que características ambientales supeditan su

desarrollo. 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 bootstrap: consiste en la proporción de unidades de muestreo que tiene cada especie. • Estimador Jackknife1 (primer orden): basado en el número de especies que ocurren en solo una muestra, funciona como técnica para reducir el sesgo estimado. • Estimador Jackknife2 (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 3: \label{tab:met

...

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* (???, ???; Appelhans, Detsch, Reudenbach, & Woellauer, 2019; Charney & Record, 2012; Neuwirth, 2014; Oksanen et al., 2019; Pebesma, 2018;

Robinson & Hayes, 2019; Wickham, 2011).

La caracterización geomorfológica se elaboró a partir del algoritmo *r.geomorphons* siguiendo el modelo de Jasiewicz & Stepinski (2013). (Ver figuras 4 y 5)

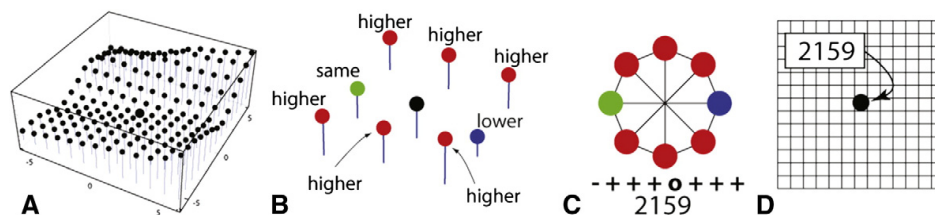


Figure 4: Modelo desarrollado por Jasiewicz & Stepinski (2013) para la caracterización del relieve.

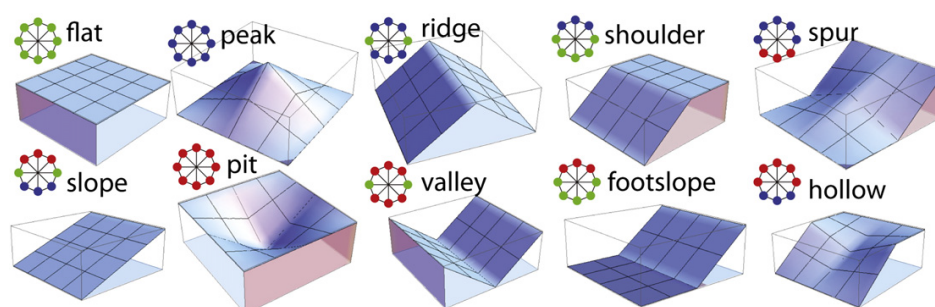


Figure 5: Ejemplos de las variantes de relieve más comunes obtenidas a través del algoritmo (ibidem).

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 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 similitud 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 por al menos una variable en específico, fueron empleadas las pruebas ANOVA para evaluar homogeneidad de medias y Kruskal-Wallis para evaluar homogeneidad de medianas. De igual forma, fue generada la diversidad alpha aplicando la función *alpha_div* a la matriz de comunidad, transformándola en una matriz de índices, entropías, equidades y ratios. En específico se crearon columnas con los índices N0 (Renyi), entropía H (diversidad de Shannon), Hb2 (entropía de Shannon en base =2), los números de diversidad de Hill (N1, Nb2, N2), J (equidad de Pielou), y las dos ratios de Hill (E10 y E20).

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 6)

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 peizizifera</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

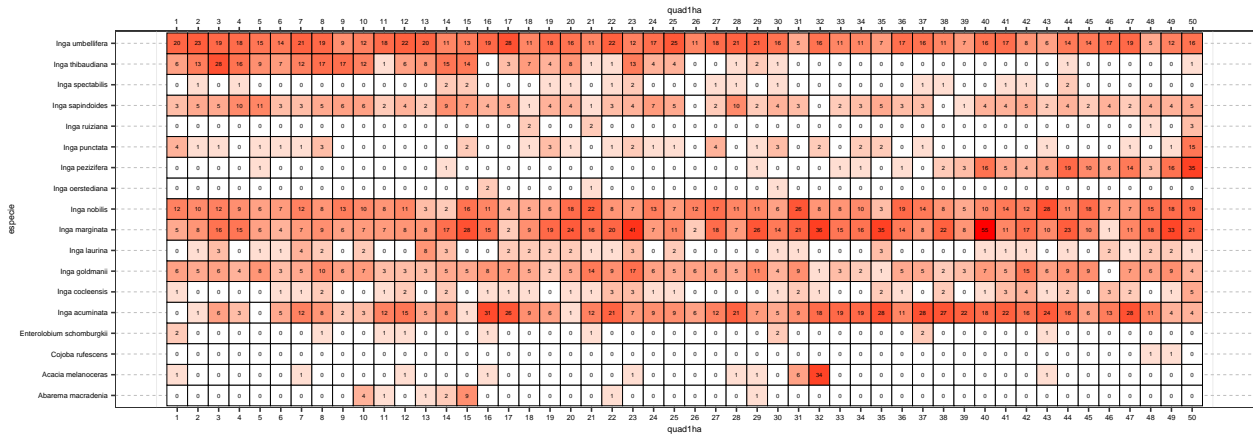


Figure 6: Abundancia por especie por quadrat

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 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 7).

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 8). 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 8). 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 9, evidencia un grado de asociación muy amplio [75%-100%] en el clúster delimitado por *Inga lauriana* e *Inga margitana*, así como uno considerable en el macroclúster comprendido entre *Inga pezizifera* 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 pezizifera* 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 10)

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. (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 figura 12). 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 porcenta-

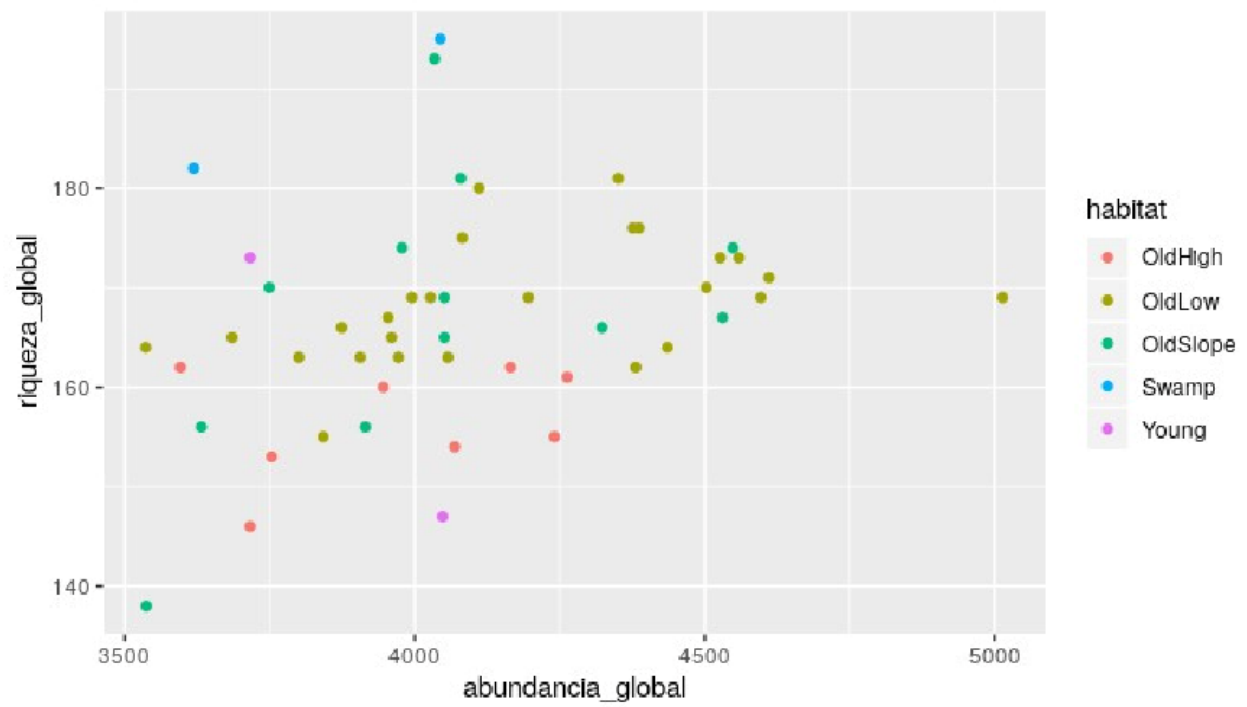
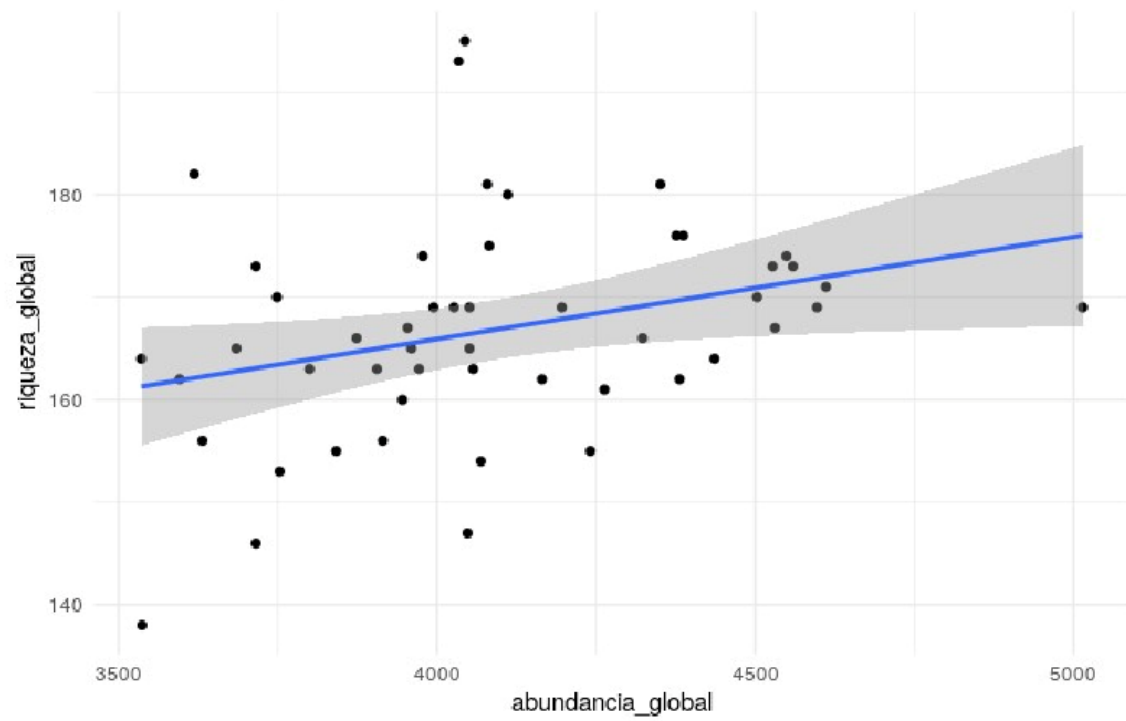


Figure 7: Distribución de sitios en función de su riqueza, abundancia, y hábitat dominante.

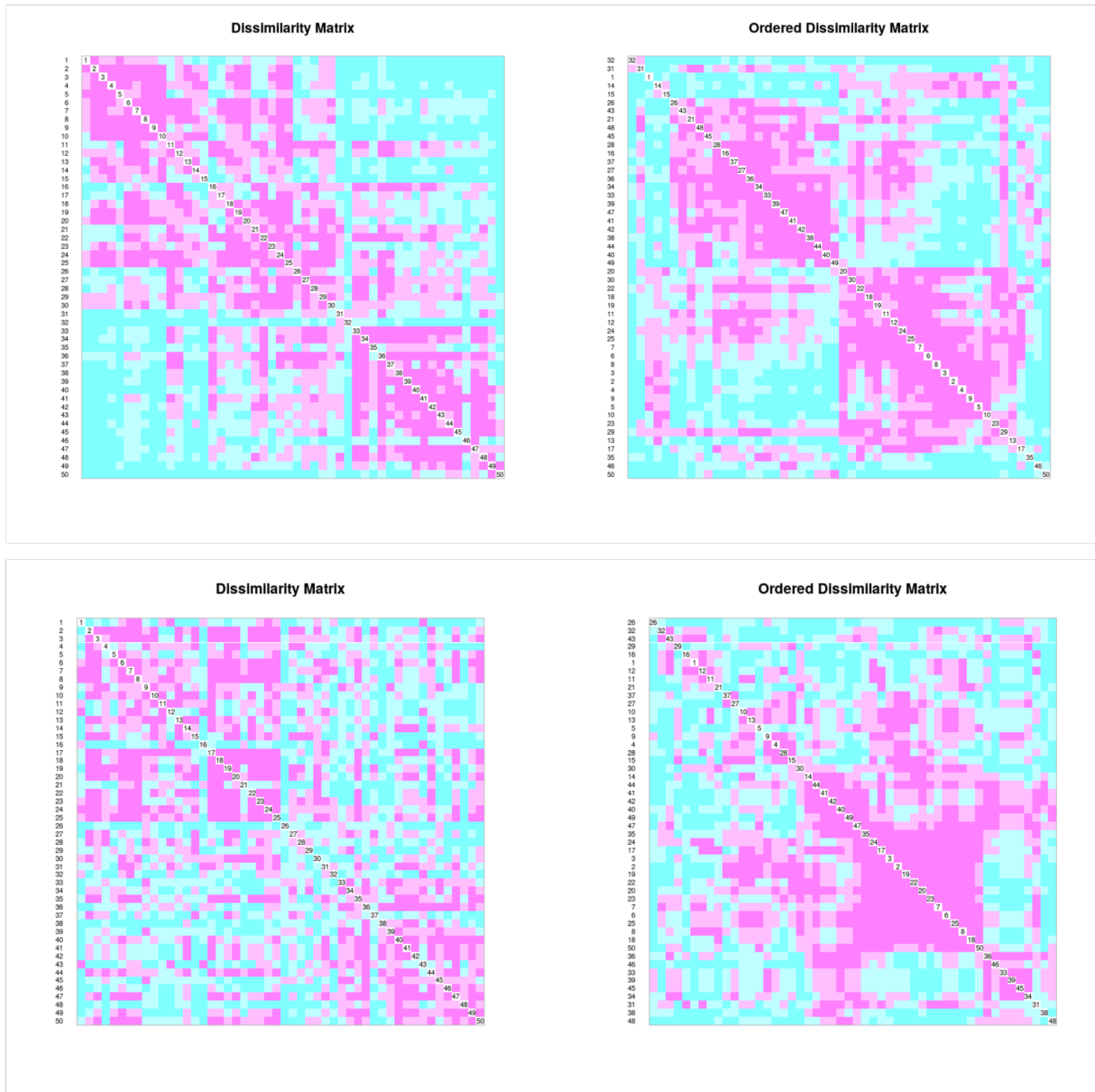


Figure 8: Mapas asociación de especies por abundancia en los sitios de muestreo (superior) y por asociación de variables ambientales y abundancia (inferior). El color azul fuerte representa “lejanía” y el rosado fuerte “proximidad”.

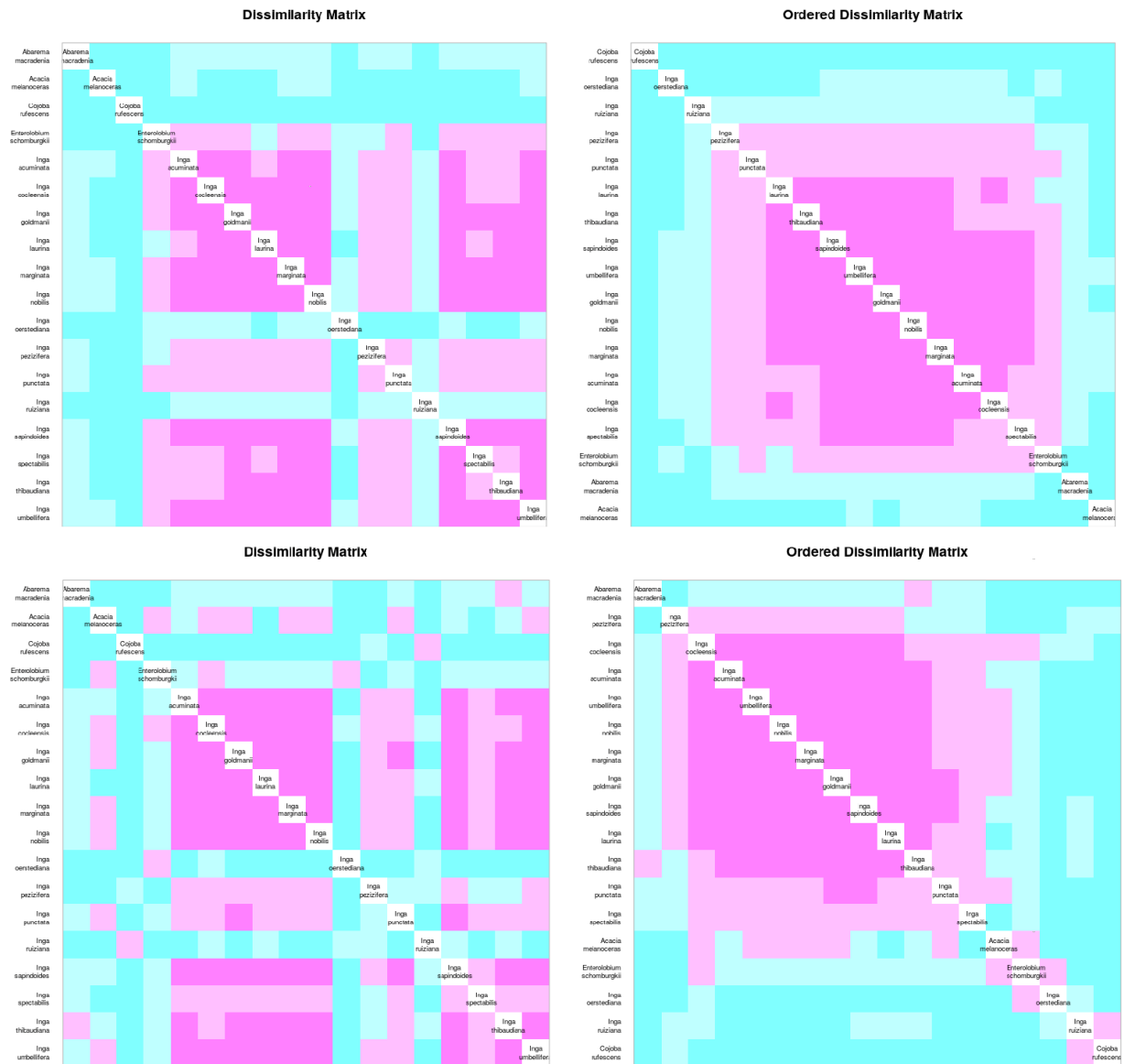


Figure 9: Mapas de calor, asociación entre especies en función de su abundancia (superior) y en función de su abundancia con matriz binaria “presencia/ausencia” (inferior).



Figure 10: Matrices de Spearman, asociación de especies en función de las variables edáficas (superior) y asociación de especies en función de las variables geomorfológicas (inferior) .

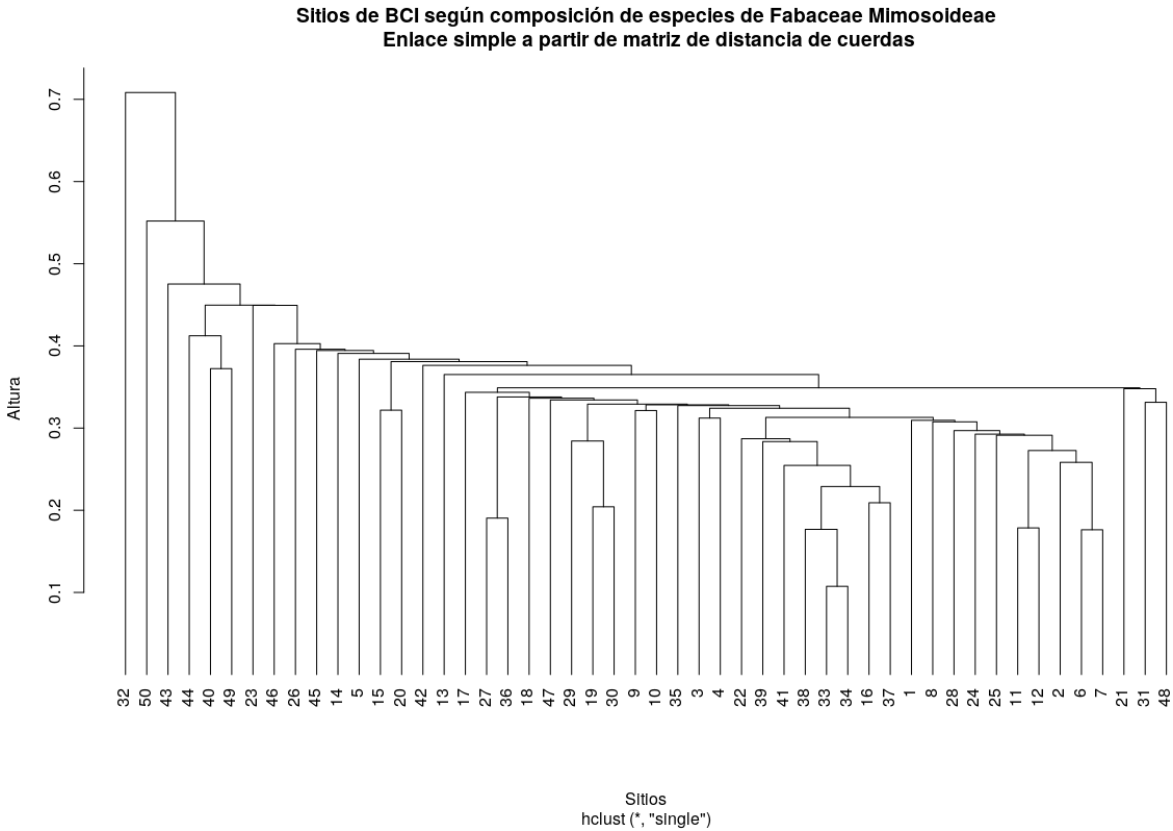


Figure 11: Dendrograma a partir del criterio enlace simple.

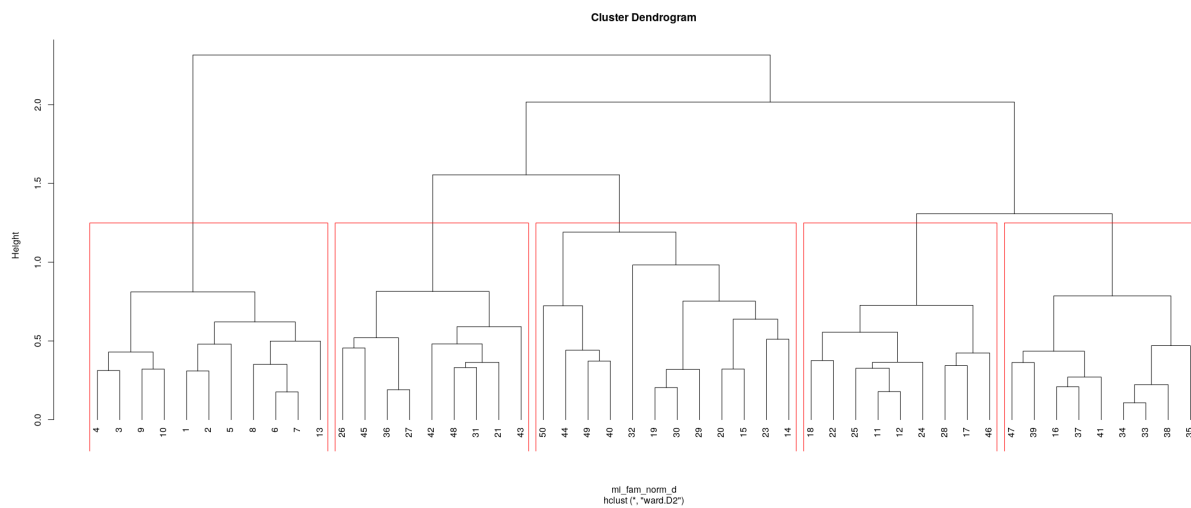


Figure 12: Dendrograma a partir del criterio enlace promedio (WARD).

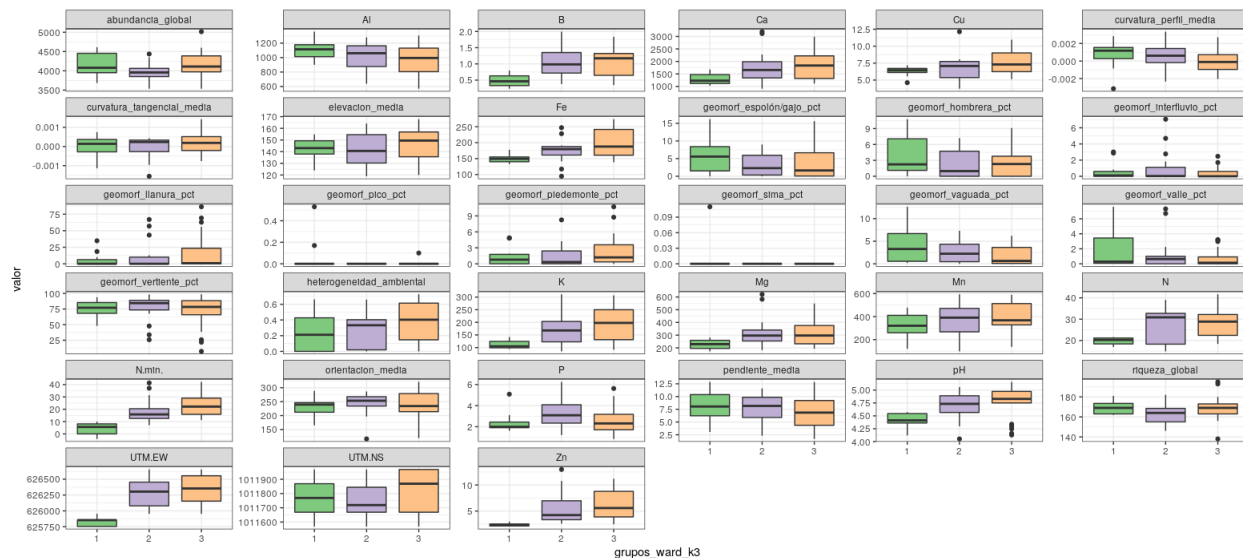


Figure 13: Diagramas de cajas en función de las variables ambientales para los grupos WARD.

7 Script reproducible

- ...
- Appelhans, T., Detsch, F., Reudenbach, C., & Woellauer, S. (2019). *Mapview: Interactive viewing of spatial data in r*. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=mapview>
- 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>
- Batlle, 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>
- Charney, N., & Record, S. (2012). *Vegetarian: Jost diversity measures for community data*. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=vegetarian>
- 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).
- Neuwirth, E. (2014). *RColorBrewer: ColorBrewer palettes*. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer>
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., ... Wagner, H. (2019). *Vegan: Community ecology package*. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*, 10(1), 439–446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Robinson, D., & Hayes, A. (2019). *Broom: Convert statistical analysis objects into tidy tibbles*. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=broom>
- 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.
- Wickham, H. (2011). The split-apply-combine strategy for data analysis. *Journal of Statistical Software*, 40(1), 1–29. Retrieved from <http://www.jstatsoft.org/v40/i01/>