

Asociación y abundancia relativa de especies de la familia Rubiaceae en la parcela permanente Isla Barro Colorado

J. Alberto Meléndez Juan *Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)*

Resumen del manuscrito

Keywords: palabra clave 1, palabra clave 2

1 Introducción

Las comunidades vegetales de los bosques neotropicales ejemplifican la diversidad y complejidad ecológica de la región tropical. El estudio continuo de su riqueza y abundancia relativa permite identificar las especies raras, las cuales son más vulnerables a los cambios en su hábitat y por lo tanto propensas a extinguirse localmente (Volkov, Banavar, Hubbell, & Maritan, 2003). Adicionalmente, monitorear la diversidad como propiedad de las comunidades vivientes resulta de suma importancia para analizar el efecto que tiene la transformación de los ecosistemas en las comunidades naturales. Claramente existe entonces la necesidad de conocer como se encuentran asociadas las especies entre sí dentro de las comunidades ecológicas para ayudar a comprender los factores que inciden en su conservación (Moreno, 2001).

La familia Rubiaceae es un importante grupo de plantas vasculares de distribución cosmopolita con una marcada diversidad en regiones tropicales y subtropicales (Davis et al., 2009). Muchas de las especies que componen esta familia se encuentran adaptadas a la vida en la penumbra, y prosperan bajo la sombra del dosel selvático. En estas selvas tropicales, el grado de ordenación y riqueza de las comunidades que componen el sotobosque dependen en gran medida de interacciones entre las distintas especies (Torres-Leite et al., 2019), además de factores ambientales de su hábitat, ya que muchas de estas especies están adaptadas a rangos elevados de acidez y otras condiciones específicas de los componentes del suelo, como la concentración de distintos metales (Jansen, Robbrecht, Beeckman, & Smets, 2000).

Es preciso señalar que trabajos anteriores (Condit et al., 2002) sobre el bosque tropical panameño y el grado de reemplazo entre especies de distintas comunidades o diversidad beta, sugieren que la disimilaridad tiende a aumentar en función de la distancia a la cual se encuentran separadas en el espacio. Sin embargo, estos trabajos no restan importancia a la variabilidad del hábitat y se toman en cuenta en este estudio, ya que un acercamiento inicial a los datos de abundancia de las distintas especies de Rubiaceae en Barro Colorado arrojó indicios de posibles patrones acerca de su distribución, y se plantea la posibilidad de que existan especies con algún grado de asociación respecto a las variables ambientales que allí imperan.

Aunque la distribución de la abundancia de las especies actualmente es en buena parte atribuida a los mecanismos que definen a una comunidad en particular, como la prevalencia de especies dominantes, relativamente más abundantes en comparación con las especies raras. Las medidas para la distribución de la abundancia relativa se encuentran sujetas a interacciones que aún no se conocen del todo, ni en qué grado inciden en la estructura de la comunidad (Néda, Horvat, Toháti, Derzsi, & Balogh, 2008).

El presente estudio evalúa la relación entre abundancia relativa de especies de la familia Rubiaceae y su distribución en una porción de bosque tropical en la parcela permanente Barro Col-

orado Island (en lo adelante BCI), Colón, Panamá. Las parcelas permanentes, como BCI, son una excelente fuente de datos demográficos y posibilitan el estudio continuo de la diversidad a nivel local y contribuyen a medir el aporte de la familia Rubiaceae a la diversidad de su comunidad. En ese sentido, este trabajo aprovecha la información disponible (Hubbell, Condit, & Foster, 2021), y herramientas de libre acceso (Martínez Batlle, 2020), para conocer posibles patrones de asociación entre estas especies, como varía la diversidad con respecto a las características del hábitat en el cual crecen estas poblaciones de plantas, y otras condiciones ambientales mediante análisis estadístico de datos de los censos realizados en BCI.

2 Metodología

2.1 *Ámbito de estudio*

BCI es una estación de censo permanente administrada por el Center for Tropical Forest Science ubicada en el centro de la isla artificial Barro Colorado, con las coordenadas 09° 09'N, 079° 50'O. La parcela consiste en un polígono de 50 hectáreas cuadradas en el cual se han contabilizado todos los árboles con más de 10 mm de diámetro a la altura del pecho cada cinco años desde 1985 (Condit, Chisholm, & Hubbell, 2012; Condit, Pérez, Lao, Aguilar, & Hubbell, 2017; Hubbell & Foster, 1983; Hubbell et al., 1990). En este estudio se utilizaron los datos del censo realizado en el año 2015.

Los datos referentes a cada uno de los 50 cuadrantes de una hectárea que componen BCI, fueron manejados en R (R Core Team, 2020), partiendo de su disposición en dos matrices: de comunidad y ambiental (Martínez Batlle, 2020). Estas matrices contienen datos de las variables ambientales, tales como condiciones edáficas, tipo de hábitat, topografía del lugar, clasificación etaria del bosque, y datos demográficos y georeferenciación espacial de todos los individuos censados. Se adaptaron *scripts* reproducibles recuperados de Martínez Batlle (2020), utilizando la colección de paquetes multifuncionales Tidyverse (Wickham, 2017), paquetes gráficos y de procesamiento de datos espaciales para la representación de mapas y figuras como mapview (Appelhans, Detsch, Reudenbach, & Woellauer, 2019) y simplefeatures (Pebesma, 2018); y herramientas de análisis estadístico como vegan (Oksanen et al., 2019), indicpecies (De Caceres & Legendre, 2009), entre otros (ver ??).

A fin de conocer las características distintivas de los datos conservados en las matrices de comunidad y ambiental, se realizó un análisis exploratorio de los mismos que incluyó la visualización de gráficos, tablas, mapas de los cuadrantes de una hectárea y paneles de correlación lineal entre variables de ambas matrices, esto permitió obtener una perspectiva general y ayudó a determinar los procedimientos posteriores que se detallan a continuación.

2.2 *Medición de asociación*

Para las pruebas de medición de asociación, se calculó la distancia euclídea entre los cuadrantes considerados como objetos. Para esto, fue requerida la transformada de la matriz de comunidad por el método de Hellinger, el cual consiste en la radicación al cuadrado de la abundancia relativa y_{ij} (cociente resultante de cada valor de abundancia entre la suma de los sitios) como muestra la fórmula 1. Donde j refiere a cada especie o columna en la matriz, i es la fila o cuadrante e $i+$ representa la suma de filas de la matriz de la i -ésima fila (Legendre & Gallagher, 2001). Además, la distancia euclídea entre cuadrantes en cuanto a la ocurrencia de especies fue evaluada aplicando el índice de disimilaridad de Jaccard de la matriz normalizada, con valores de abundan-

cia convertidos en valores binarios (Borcard, Gillet, & Legendre, 2018). De la misma manera, se utiliza la métrica de Jaccard aplicada a la matriz de comunidad transpuesta y convertida a datos de presencia/ausencia para medir el grado de asociación entre especies.

$$y' = \sqrt{\frac{y_{ij}}{y_{i+}}} \quad (1)$$

Para poder comparar la relación entre las especies según su abundancia numérica, se utilizó estandarización *ji*-cuadrado de la matriz de comunidad transpuesta (Legendre & Gallagher, 2001). La ocurrencia entre las especies y su distribución en BCI fue examinada por medio de el coeficiente de correlación entre rangos de Spearman para medir el grado de asociación entre las variables riqueza numérica de especies y la abundancia con las variables ambientales geomorfológicas y la composición química del suelo (Borcard et al., 2018).

2.3 *Análisis de agrupamiento*

Tanto el método jerárquico aglomerativo de asociación entre pares de cuadrantes (según su composición de especies) bajo el criterio de enlace completo y el método Ward basado en la varianza mínima, fueron utilizados en un acercamiento preliminar al análisis de agrupamiento para contrastar su eficacia en conseguir grupos consistentes y con significado ecológico (Borcard et al., 2018). Estos generaron dendrogramas que posteriormente son comparados con la matriz de distancia de cuerdas (Legendre & Gallagher, 2001), utilizando correlación cofenética entre ambos para determinar el número ideal de grupos. Además, se utilizó remuestreo bootstrap y bootstrap multiescalar para conocer la probabilidad de éxito en la inferencia del número de grupos y la identidad de sus componentes (Borcard et al., 2018). Las reparticiones se basaron en una probabilidad de 91% o más de acierto para el método bootstrap y de un 95% para bootstrap multiescalar.

Puesto que se encontraron patrones consistentes en la composición y número de grupos entre los métodos examinados, los análisis de agrupamiento posteriores realizados en este trabajo se basaron en los producidos mediante enlace completo, para el cual se consideraron dos grupos compuestos por 20 y 30 cuadrantes, respectivamente.

Para conocer cuales especies son características o se encuentran asociadas a cada grupo, se utiliza la métrica del “valor indicador” o IndVal (Dufrene & Legendre, 1997), la cual está basada en permutaciones aleatorias de los sitios según la ocurrencia de las especies y su abundancia. Así mismo, se estudia el grado de asociación de las especies con cierta preferencia por las combinaciones de cuadrantes consideradas como grupos, indicado por el coeficiente de correlación biserial puntual (Borcard et al., 2018). Se llevó a cabo un acercamiento parecido al anterior durante las pruebas estadísticas de la hipótesis nula, sobre la base de que las especies que se encontraban en cuadrantes pertenecientes a un determinado grupo lo hacían por obra del azar. Esta prueba se logró mediante reordenación aleatoria de los valores de abundancia y comparando su distribución con los valores obtenidos anteriormente (Cáceres & Legendre, 2009). Para estas pruebas de asociación y las subsiguientes se utilizó un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

2.4 *Ordenación*

Las características de la varianza en los datos ambientales en BCI fueron estudiados mediante análisis de sus componentes principales (PCA) (Borcard et al., 2018). Este método permitió resumir la multidimensionalidad de las variables, explicar la varianza y los posibles patrones que

estos podrían seguir. Esto se realizó también para la matriz de comunidad, con valores de abundancia normalizados por la transformada Hellinger, además de un análisis de correspondencia (CA) de la misma matriz. De manera alternativa, se realiza un análisis de las coordenadas principales (PCoA) para ayudar a conocer la relación entre las especies, utilizando el coeficiente de disimilitud de Jaccard como medida, y a su vez usando los promedios ponderados por los valores de abundancia para permitir su representación en los diagramas *biplot* (Borcard et al., 2018).

Se realizó un acercamiento restringido de la ordenación para probar el grado de dependencia de los datos de la matriz de comunidad con la matriz ambiental, mediante ajuste lineal en un análisis de redundancia (RDA) (Borcard et al., 2018), utilizando la matriz de comunidad transformada por Hellinger. Se seleccionaron las variables que presentaron cierto grado de asociación, y (a discreción y de manera secuencial) se excluyeron algunas de estas, con el objetivo de reducir el grado de colinealidad entre las variables independientes restantes.

2.5 Análisis de la diversidad

Con la finalidad de asignar medidas apropiadas a la diversidad de especies, y aprovechando su relación con los índices de Shannon y Simpson, se empleó la serie de números de diversidad de Hill, la fórmula de la entropía de Rengi y el índice de equidad de Pielou. Se examinó la posible correlación entre estas medidas y las variables ambientales que aparentaron tener algún efecto en la riqueza y equidad de la comunidad (Borcard et al., 2018). Además, mediante interpolación por rarefacción al número de individuos del cuadrante con la menor abundancia, se compara el valor esperado de riqueza para todos los sitios. Adicionalmente, se estima la riqueza de la familia Rubiaceae que resultaría de aumentar al doble el muestreo realizado en BCI, mediante los métodos de extrapolación incluidos en las colecciones de funciones SpadeR y iNEXT (Chao, Ma, Hsieh, & Chiu, 2016; Hsieh, Ma, & Chao, 2020), modificadas por Martínez Batlle (2020).

La variación en la composición y abundancia de especies de la comunidad, es medida utilizando el índice multiplicativo de diversidad beta basado en los números de Hill (Borcard et al., 2018). Finalmente, se examina la contribución a la diversidad beta por parte de las especies y los sitios en BCI, al analizar la varianza de la abundancia y riqueza de los cuadrantes y las especies. Estos valores fueron comparados con la varianza promedio, y se considera entonces que las especies cuya varianza promedio supera la mitad de la varianza promedio total, presentan una contribución importante a la diversidad beta de la comunidad (Borcard et al., 2018).

3 Resultados

La familia Rubiaceae en Barro Colorado se encuentra representada por 31 especies y 20 géneros. El género *Psychotria* presenta la mayor riqueza (8 especies). La tabla 1 resume las abundancias de las especies de toda la comunidad, que en total suman 41,838 individuos, con una abundancia media de 65 individuos y mediana ubicada en los 1,350 individuos. El mapa de cuadros de la figura 1 presenta la riqueza numérica de las especies por cuadrante. Los valores de abundancia muestran un aparente patrón en la parte centro-occidental de BCI, en donde además se encuentran los sitios con la mayor abundancia de la familia (ver figura 3).

Latin	n
-------	---

Table 1: Abundancia por especie.

Latin	n
<i>Faramea occidentalis</i>	24989
<i>Alseis blackiana</i>	7928
<i>Psychotria horizontalis</i>	2453
<i>Coussarea curvigemma</i>	2010
<i>Palicourea guianensis</i>	1118
<i>Randia armata</i>	937
<i>Psychotria marginata</i>	761
<i>Alibertia edulis</i>	417
<i>Pentagonia macrophylla</i>	306
<i>Guettarda foliacea</i>	252
<i>Hamelia axillaris</i>	128
<i>Macrocnemum roseum</i>	87
<i>Posoqueria latifolia</i>	73
<i>Psychotria limonensis</i>	70
<i>Genipa americana</i>	67
<i>Psychotria graciliflora</i>	65
<i>Psychotria grandis</i>	57
<i>Psychotria deflexa</i>	38
<i>Amaioua corymbosa</i>	19
<i>Psychotria chagrensis</i>	16
<i>Psychotria acuminata</i>	14
<i>Tocoyena pittieri</i>	8
<i>Psychotria racemosa</i>	7
<i>Psychotria cyanococca</i>	4
<i>Chimarrhis parviflora</i>	3
<i>Coutarea hexandra</i>	3
<i>Psychotria brachiata</i>	3
<i>Appunia seibertii</i>	2
<i>Borojoa panamensis</i>	1
<i>Psychotria hoffmannseggiana</i>	1
<i>Rosenbergiodendron formosum</i>	1

Los valores para el coeficiente de Spearman presentados en el panel de correlación de la figura 3 no mostraron evidencia de que exista relación entre la riqueza numérica de especies y la abundancia con las variables geomorfológicas notadas en la matriz de variables ambientales. Sin embargo, el mismo análisis sugiere una posible relación entre la abundancia numérica de especies y la composición del suelo, mostrando relación positiva con valores altos de Aluminio y Fósforo. Así como negativa, para valores altos de pH y concentraciones de otros elementos.

!Panel de correlación de Spearman entre la diversidad/abundancia de rubiaceas y las variables edafológicas [(panel_cor_suelo_abun_ric_rubic_spear.png)

Las variables fósforo y cobre obtuvieron valores de P 0.0000347 y 0.0127 “significativos” en las



Las especies *Alseis blackiana* y *Psychotria limonensis* fueron las que obtuvieron un valor alto de confianza al examinar su potencial como especies indicadoras del grupo 1 (grupo 2 en Ward). Para el caso del grupo 2 (1 en Ward), las especies indicadoras fueron *Faramea occidentalis*, *Psychotria horizontalis* y *Coussarea curvigemma*. La ocurrencia de *A. blackiana* y *Pentagonia macrophylla* indica su preferencia por el grupo 1 (complete). Por otra parte, en el grupo 2 (complete) siete especies resultan de interés por su ocurrencia: la muy dominante *F. occidentalis*; *Psychotria deflexa*, *P. racemosa*, *P. horizontalis*, *Posoqueria latifolia*, *Alibertia edulis* y *Coussarea curvigemma*. En los grupos generados mediante Ward solo *F. occidentalis*, *P. horizontalis* y *A. blackiana* resultaron compatibles en las pruebas de fidelidad de asociación.

En la figura 6, se aprecian tres grupos de cuadrantes en el recuadro rotulado como escalamiento 1 de los diagramas *Biplot* generados en el PCA de las variables de suelo, en el cual además, se observa que las variables Nitrógeno, Fósforo y pH aportan la mayor parte de la varianza. La relación entre estas variables se encuentra debidamente representada en el recuadro del escalamiento 2, por medio de los ángulos que forman sus vectores. En el caso de las variables geomorfológicas, algunos sitios están asociados a un alto porcentaje de llanura y hombrera, aunque la mayoría se encuentra más cerca del origen formado por los ejes de los componentes principales 1 y 2 (ver figura 7).

6

explicar el 73.1% y el 43.6% de la varianza total respectivamente. En estos gráficos se incluye el comportamiento predecido por el modelo de barra quebrada, representado por la línea roja formando la curva.

Los resultados del PCA de los datos de la matriz de comunidad se encuentran resumidos en los diagramas de la figura 8. El escalamiento 1, muestra muchos de los cuadrantes dispuestos alrededor del origen formado por los ejes, además de unos cuantos cuadrantes atípicos y más alejados. Por otro lado, las especies *A. blackiana*, *C. curvigemmia*, *P. marginalis* y *P. horizontalis*, presentan una contribución desproporcionada a la varianza total, en comparación con el resto de las especies.

5 CA Esto puede ser interesante, discutir

La varianza explicada por los componentes principales 1 y 2 en el CA para las especies *Psychotria graciliflora* y *Psychotria grandis* se muestran aparentemente asociadas en el escalamiento 2 de la figura 9. Además, se observa que casi todas las especies se encuentran próximas al punto de intersección, salvo aquellas que presentaron una abundancia reducida, las cuales aparecen asociadas a pequeños grupos de cuadrantes sin un patrón evidente. La disparidad en la incidencia de las especies podría estar reflejándose con su disposición en el diagrama. No obstante, estos resultados no coinciden con los arrojados por el PCA de la matriz de distancias Hellinger (Fig. 8).

6 PCoA

Los resultados del análisis de coordenadas principales mostrado en la fig. 10 contienen la relación entre las especies y los cuadrantes por medio de las distancias de Jaccard. En el *biplot* se incluye, además, los vectores de las variables ambientales, en los que se observa asociación entre el contenido de cobre, manganeso y fósforo con algunos sitios y especies. También, algunas especies se presentan aparentemente asociadas entre sí, como también a algunos cuadrantes. Aunque otra vez, es probable que la aparente asociación aparezca debido a la combinación de una incidencia restringida por parte de estas especies y al grado de autocorrelación entre los cuadrantes.

7 RDA

En cuanto a los *triplots* generados por RDA mostrados en la figura 11 se destacan los la distancia euclídea conservada entre las especies. Estas últimas se disponen en forma de abanico; algunas resultan aberraciones, muy alejadas del punto de intercepto, sitios emjambrados en el origen y las especies en dispuestas en forma de abanico a su alrededor. Esto indica poca asociación entre las especies, no se encuentra un patrón evidente entre la mayoría. Se destaca un grupo de cuadrantes en los cuales *Psychotria horizontalis* y *Psychotria marginata* se encuentran asociadas. Al parecer, este grupo de cuadrantes constituye un microhabitat encontrado sobre una pequeña meseta en la parte nor-oriental de BCI, y se diferencia además por una alta concentración de fósforo y aluminio en el suelo. La especie *Alseis blackiana* presenta asociación con el contenido de metales como manganeso, hierro y cobre en el suelo, esto coincide con los resultados del PCA, y podría ser considerada como una especie indicadora de estas condiciones ambientales.

8 Diversidad

La riqueza de la familia aumenta con el hierro, así también la equidad. Además, parece que la riqueza aumenta en los suelos con un alto contenido de nitrógeno en el suelo y en su forma mineralizada. La equidad también es mayor hacia el norte de bci [12].

13

Sitio 1 con la menor riqueza presenta una de las mayores dominancias. También el sitio 28 aunque no tanto por el número de especies presentado, sino más bien por su desorbitada abundancia (1414 indiv.) . 50 con la menor abundancia.

Aparte del cuadrante 50, los sitios con la mayor riqueza presentan también mucha abundancia. las especies dominantes están adaptadas a reclutar nuevos individuos con y sin interferencia de otras especies? Las especies menos abundantes están adaptadas a vivir apretujadas? Es todo esto casualidad?

Las especies que contribuyen de manera significativa a la diversidad beta. Muchas de estas especies fueron consideradas “indicadoras” debido a su abundancia. Con la excepción de la especie *Macrocnemum roseum*, la cual presenta una abundancia mucho menor a la de las demás especies que resultan de este análisis.

Alseis blackiana *Coussarea curvigemma* *Faramea occidentalis* *Macrocnemum roseum* *Palicourea guianensis* 0.18474561 0.15378542 0.05287862 0.03793339 0.09128798 *Pentagonia macrophylla* *Psychotria horizontalis* *Psychotria limonensis* *Psychotria marginata* 0.03945305 0.11389433 0.03848514 0.08084602

El grado de reemplazo o diversidad beta entre. . . se midió utilizando del índice multiplicativo de diversidad beta aplicando

el comportamiento de la dominancia que siguen las especies de la comunidad— en cuanto a la dominancia de las especies

La representatibilidad de la parcela permanente comparada con el valor posible real de la riqueza de esta familia a nivel local?

Estimar la riqueza que se conseguiría con más parcelas de censo en BCI?

El grupo 2 (1 en Ward) contiene los sitios con tendencia a presentar valores altos de acidez [4] y concentración de aluminio.

9 Discusión

La determinación de las especies indicadoras *Faramea occidentalis* y *Alseis blackiana* de los grupos uno y dos podría estar asociada a la evidente dominancia que presentan estas especies en la comunidad de rubiaceas. Especialmente *F. occidentalis*, cuya abundancia alcanza valores extremos dentro de todo BCI e incluso podría estar inclinando los resultados de estos análisis?. Esto se vuelve razonable al tomarse en cuenta el hecho de que muchas especies se presentaban con pocos valores de abundancia, varias incluso representadas por un solo individuo. Las especies con preferencia por el grupo 1 evaden sistemáticamente al grupo 2 y viceversa. Esta diferenciación en la ocurrencia de las especies no se explica del todo con las variables ambientales medidas en BCI y es posible que exista algún otro factor que determina la ordenación de esta comunidad de plantas. La cobertura del dosel arbóreo podría ser una de estas variables a considerarse, puesto que las especies dominantes en la comunidad son a la vez tolerantes a la sombra (Grandtner & Chevrette, 2013). la relación entre la abundancia de la familia y el contenido de aluminio y fósforo. Esto coincidió con los análisis de la varianza explicada entre variables, aunque solo para la concentración de fósforo. Adicionalmente, la comunidad de rubiaceas pareciera poder dividirse en dos grupos relativamente bien diferenciados entre sí por sus diferencias en el contenido de *Cu* y *P* del

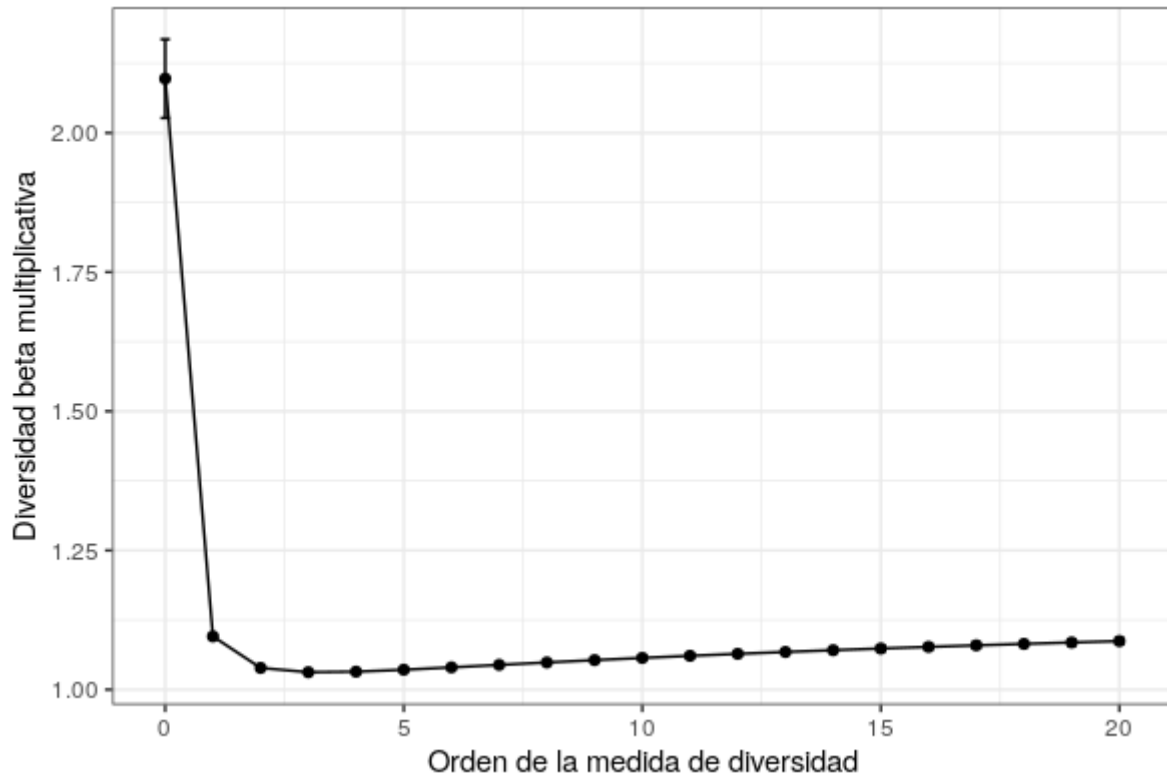


Figure 2: Gráfico de la diversidad beta multiplicativa en función de los números en la serie de Hill. Se observa que la riqueza de especies (número de Hill 0) presenta la mayor contribución a la medida de diversidad beta para la comunidad. Así sucede ya que la abundancia de las especies dominantes no varía drásticamente entre cuadrantes, y es principalmente su composición de especies lo que diferencia a los sitios entre sí.

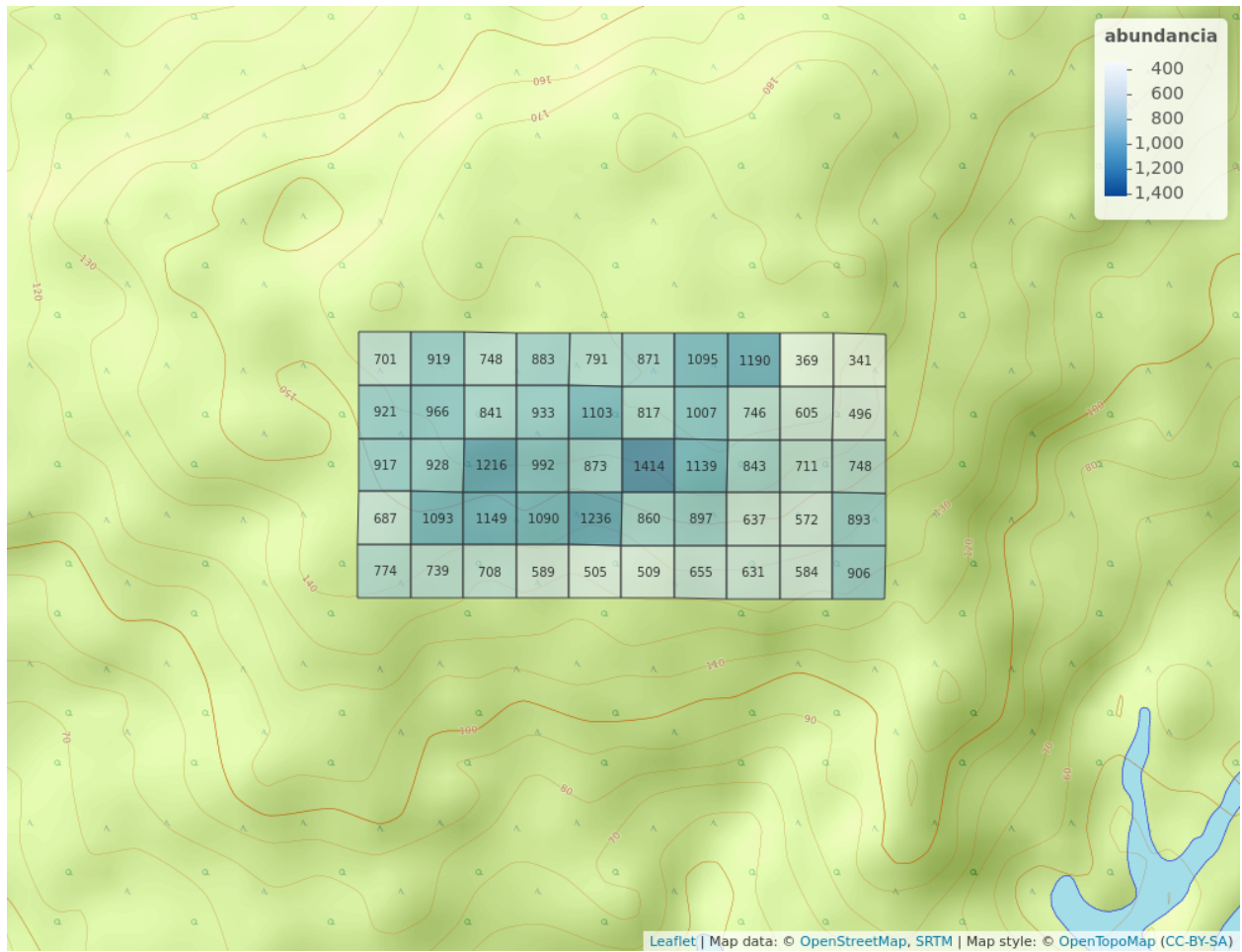


Figure 3: Abundancia de rubiaceas en BCI

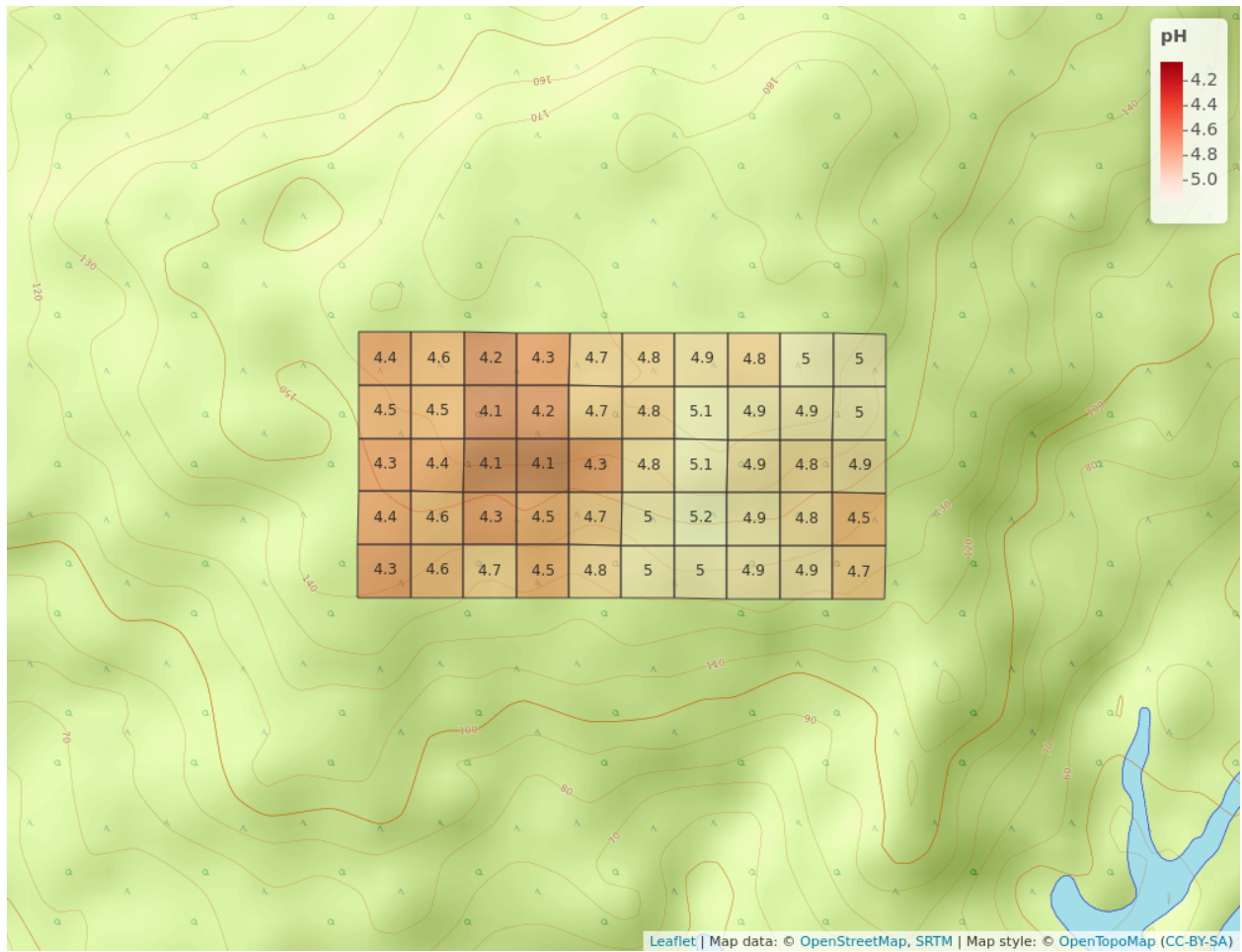


Figure 4: pH del suelo en los cuadros de 1ha

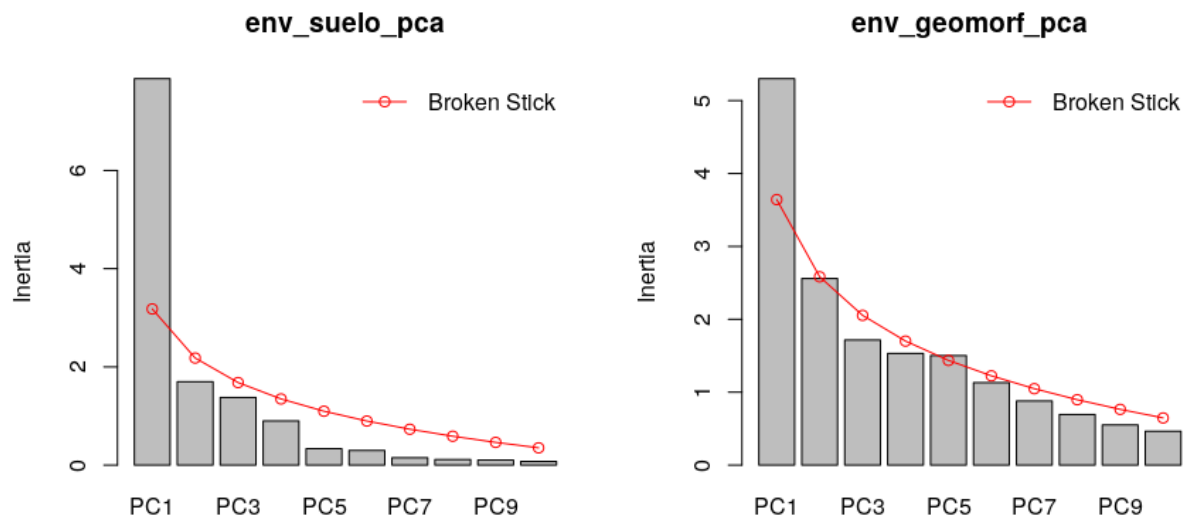


Figure 5: Componentes principales de la varianza en las variables de suelo y geomorfología en BCI (La escala denominada “Inertia” representa la suma de los cuadrados de toda la varianza).

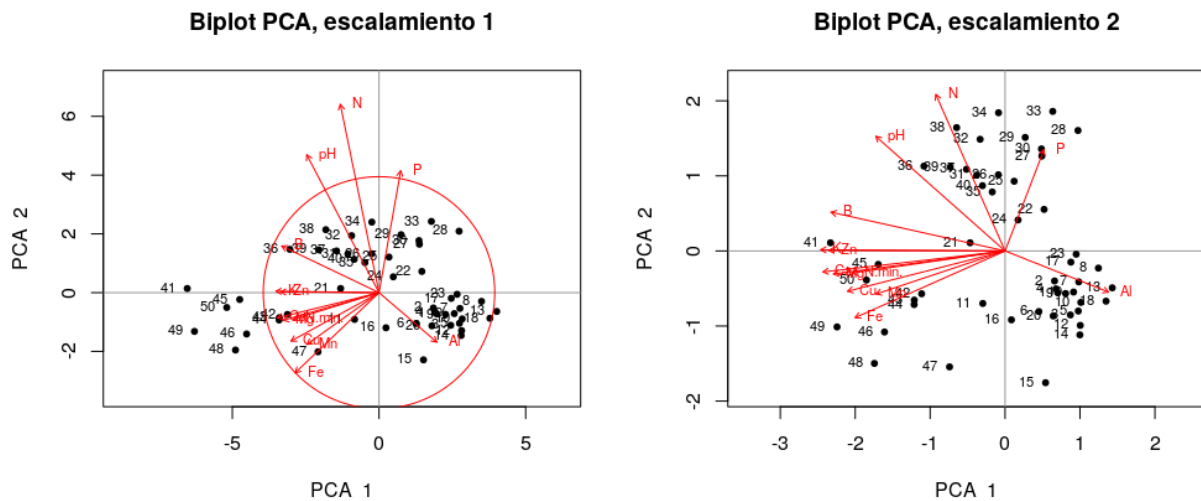


Figure 6: Biplots generados en el PCA de las variables de suelo.

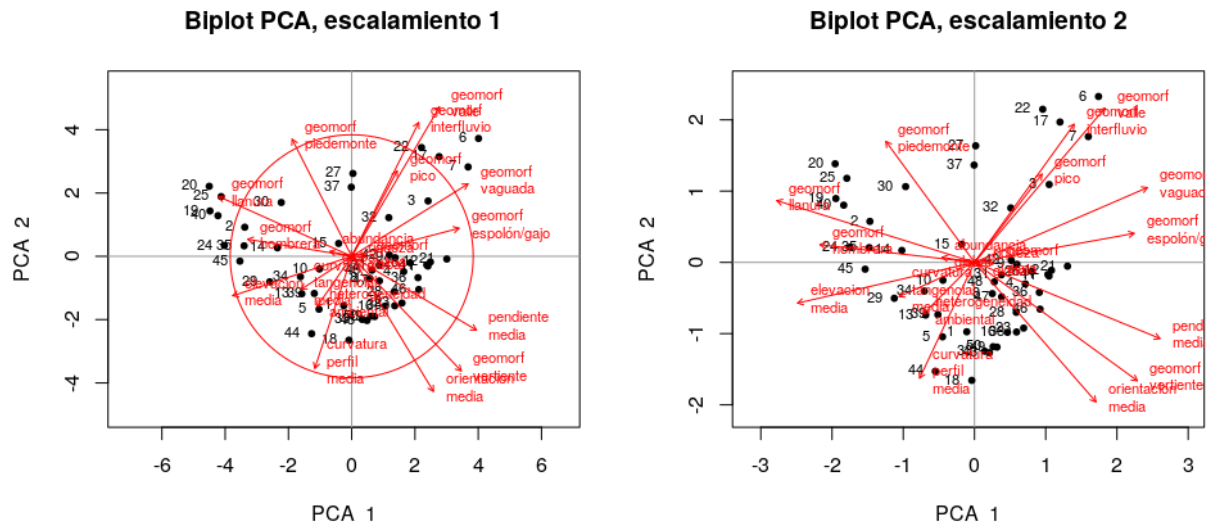


Figure 7: Biplots generados por PCA de las variables geomorfológicas.

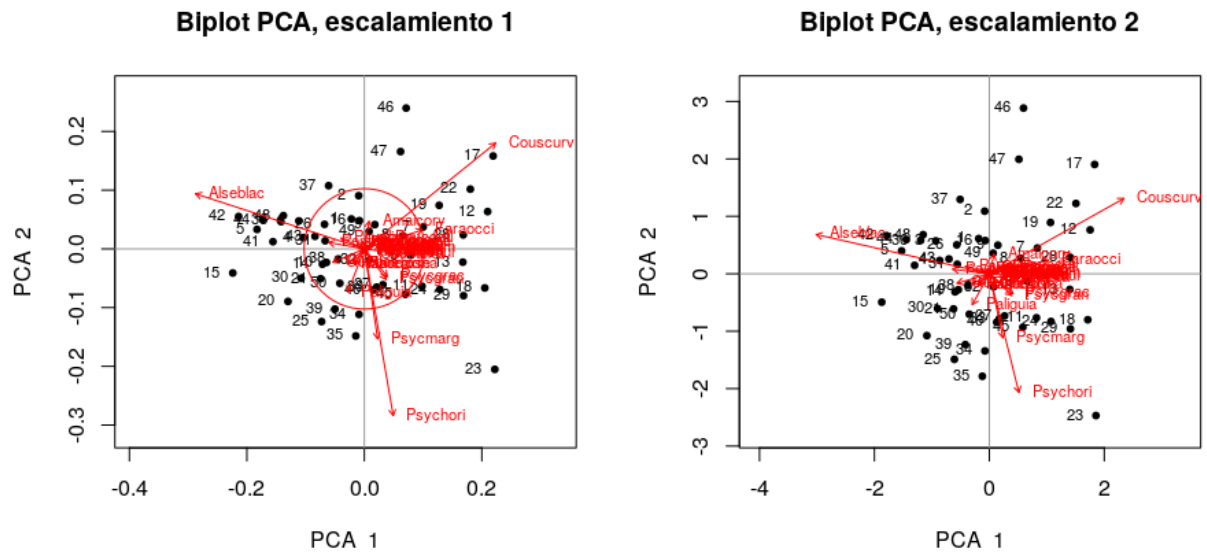


Figure 8: Biplots producidos por PCA de los datos de comunidad transformados a distancias Hellinger.

PCoA con promedios ponderados de especies

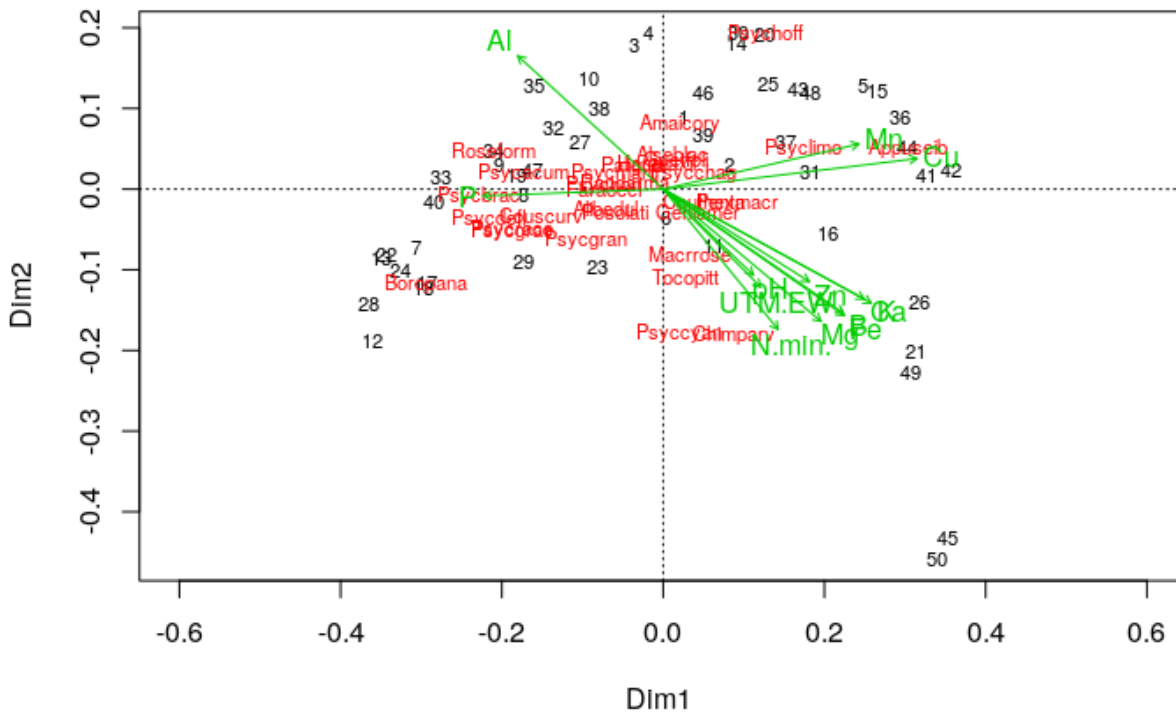
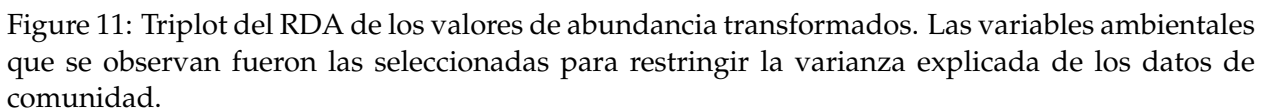


Figure 10: Biplot de PCoA de las distancias de Jaccard. Las distancias entre especies están ponderadas en base a sus valores de abundancia.



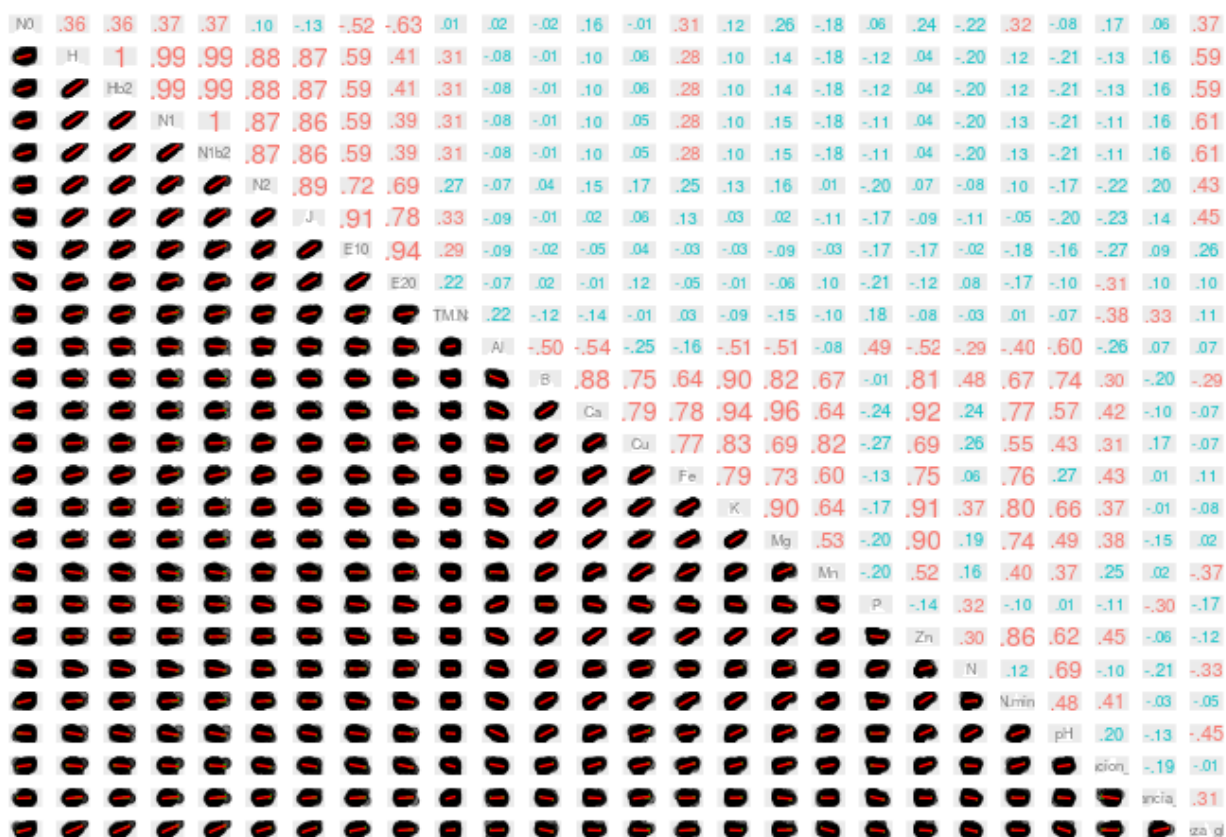


Figure 12: Correlación entre diversidad/equidad y algunas de las variables ambientales destacadas. N0: riqueza de especies; *H*: entropía de Shannon; *Hb2*: entropía de Shannon con 2 como base del logaritmo; *N1* y *N2*: Números de Hill; *N1b2*: Número de Hill 1 en base log 2; *J*: Equidad de Pielou; *E10* y *E20*: ratios de Hill 1 y 2.

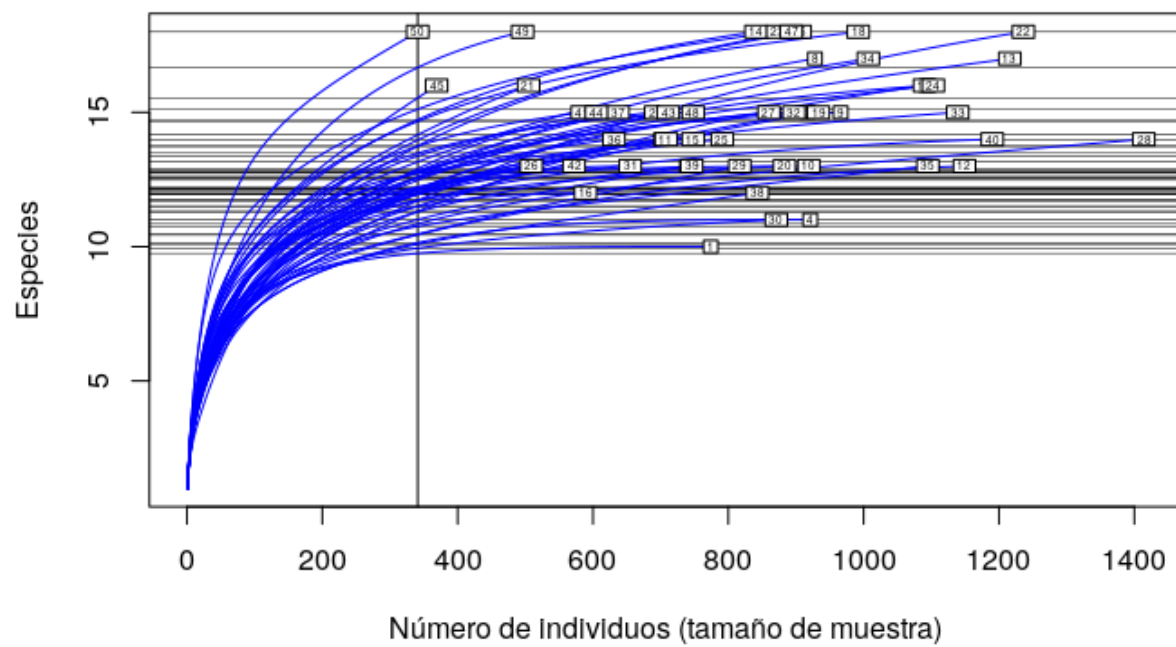


Figure 13: Curva de rarefacción. Las barras horizontales muestran el valor de la riqueza esperada en cada sitio al interpolar las muestras hacia la abundancia mínima observada (341 individuos), presente en el cuadrante #50.

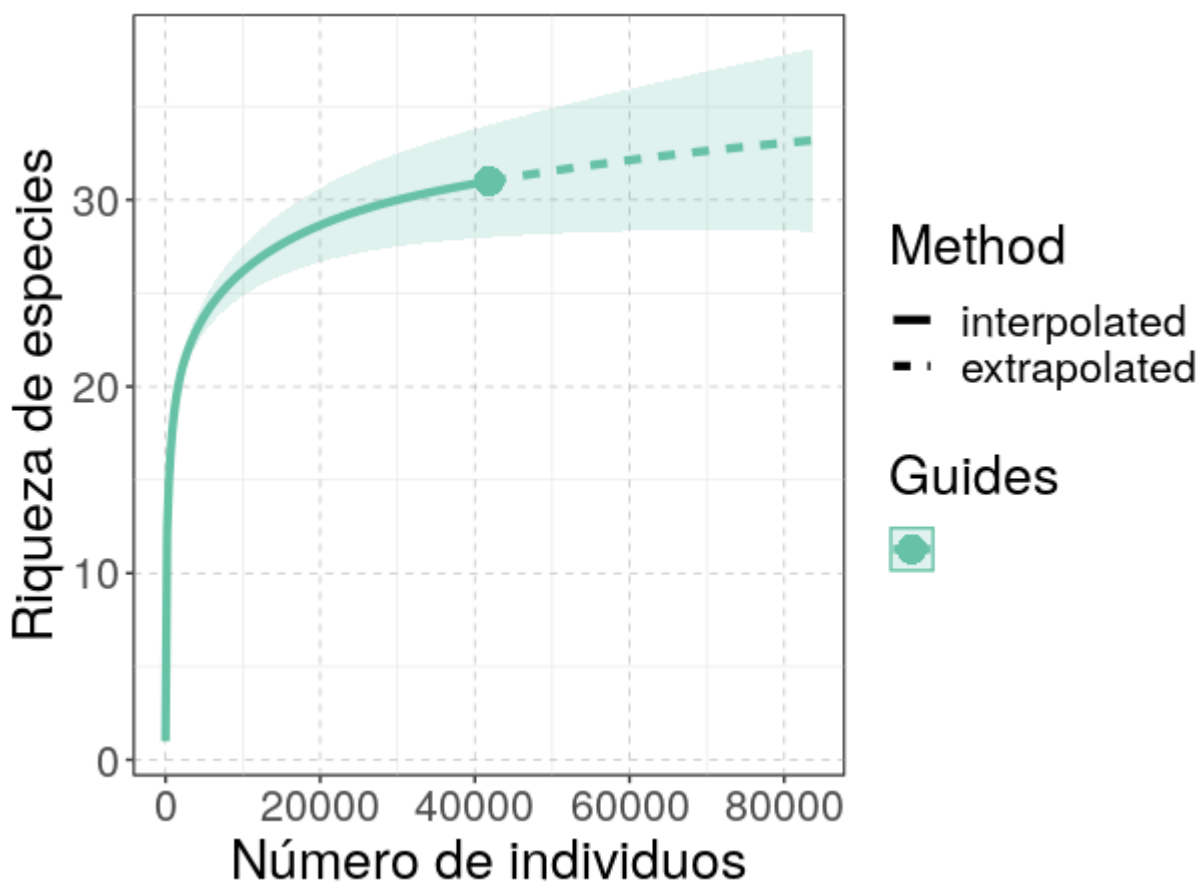


Figure 14: Curva de acumulación de especies hacia el doble de la abundancia encontrada en BCI. Se estima que la riqueza aumentaría en cuatro especies en consecuencia de duplicar el senso, o replicarlo en otra zona de Barro Colorado. El intervalo para un 95% de confianza se representa con los márgenes verde pálido.

10 Agradecimientos
11 Información de soporte

...

12 Script reproducible

...

Referencias

- 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>
- Baillie, I., Elsenbeer, H., Barthold, F., Grimm, R., & Stallard, R. (2006). *Semi-detailed soil survey of barro colorado island, panama*.
- Borcard, D., Gillet, F., & Legendre, P. (2018). *Numerical Ecology with R. Second Edition* (pp. 52–66). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71404-2>
- Cáceres, M. D., & Legendre, P. (2009). Associations between species and groups of sites: Indices and statistical inference. *Ecology*, 90(12), 3566–3574.
- Chao, A., Ma, K. H., Hsieh, T. C., & Chiu, C.-H. (2016). *SpadeR: Species-richness prediction and diversity estimation with r*. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=SpadeR>
- Condit, R., Chisholm, R. A., & Hubbell, S. P. (2012). Thirty years of forest census at Barro Colorado and the importance of immigration in maintaining diversity. *PLOS ONE*, 7(11), 1–6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049826>
- Condit, R., Pérez, R., Lao, S., Aguilar, S., & Hubbell, S. P. (2017). Demographic trends and climate over 35 years in the Barro Colorado 50 ha plot. *Forest Ecosystems*, 4(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0103-1>
- Condit, R., Pitman, N., Leigh, E., Chave, J., Terborgh, J., Foster, R., ... Hubbell, S. (2002). Beta-diversity in tropical forest trees. *Science (New York, N.Y.)*, 295, 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1066854>
- Davis, A. P., Govaerts, R., Bridson, D. M., Ruhsam, M., Moat, J., & Brummitt, N. A. (2009). A global assessment of distribution, diversity, endemism, and taxonomic effort in the rubiaceae1. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 96(1), 68–78.
- De Cáceres, M., & Legendre, P. (2009). Associations between species and groups of sites: Indices and statistical inference. In *Ecology*. Retrieved from <http://sites.google.com/site/miqueldecaceres/>
- Dufrene, M., & Legendre, P. (1997). Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67, 345–366. <https://doi.org/10.2307/2963459>
- Grandtner, M., & Chevrette, J. (2013). *Dictionary of trees, volume 2: South america: Nomenclature, taxonomy and ecology*. Retrieved from <https://books.google.com.do/books?id=XALRl1qzcLMC>
- Hsieh, T. C., Ma, K. H., & Chao, A. (2020). *INEXT: Interpolation and extrapolation for species diversity*. Retrieved from http://chao.stat.nthu.edu.tw/wordpress/software_download/
- Hubbell, S. P., & Foster, R. B. (1983). Diversity of canopy trees in a neotropical forest and implications for conservation. In T. Whitmore, A. Chadwick, & A. Sutton (Eds.), *Tropical rain forest: Ecology and management* (pp. 25–41). Oxford: The British Ecological Society.
- Hubbell, S. P., Condit, R., Foster, R. B., Grubb, P. J., Thomas, C. D., Hassell, M. P., & May, R. M. (1990). Presence and absence of density dependence in a neotropical tree community. *Philosophical*

Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 330(1257), 269–281. <https://doi.org/10.1098/rstb.1990.0198>

Hubbell, S., Condit, R., & Foster, R. (2021). Forest Census Plot on Barro Colorado Island. Retrieved March 23, 2021, from <http://ctfs.si.edu/webatlas/datasets/bci/>

Jansen, S., Robbrecht, E., Beeckman, H., & Smets, E. (2000). Aluminium accumulation in rubiaceae: An additional character for the delimitation of the subfamily rubioideae? *IAWA Journal*, 21. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000245>

Legendre, P., & Gallagher, E. (2001). Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129, 271–280. <https://doi.org/10.1007/s004420100716>

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

Moreno, C. E. (2001). *Manual de métodos para medir la biodiversidad*. Universidad Veracruzana.

Néda, Z., Horvat, S., Toháti, H. M., Derzsi, A., & Balogh, A. (2008). A spatially explicit model for tropical tree diversity patterns. *arXiv E-Prints*, arXiv:0803.3704.

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>

Patino, L., Velbel, M., Price, J., & Wade, J. (2003). Trace element mobility during spheroidal weathering of basalts and andesites in hawaii and guatemala. *Chemical Geology*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.01.002>

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>

R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. Retrieved from <https://www.R-project.org/>

Torres-Leite, F., Cavatte, P. C., Garbin, M. L., Hollunder, R. K., Ferreira-Santos, K., Capetine, T. B., ... Carrijo, T. T. (2019). Surviving in the shadows: Light responses of co-occurring rubiaceae species within a tropical forest understory. *Flora*, 261, 151487. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.151487>

Volkov, I., Banavar, J. R., Hubbell, S. P., & Maritan, A. (2003). Neutral theory and relative species abundance in ecology. *Nature*, 424(6952), 1035–1037. <https://doi.org/10.1038/nature01883>

Wickham, H. (2017). *Tidyverse: Easily install and load the 'tidyverse'*. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=tidyverse>