

DIVERSIDAD, EFECTOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y SERVICIOS ECOSISTEMICOS EN EL CONTEXTO DEL ARBOLADO PÚBLICO URBANO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

Rodríguez-Rocha Manuel¹, Diana Lara², Pilar Velandia², Diego Álvarez², Richard Gutiérrez³, Eliana Torres² Germán Tovar², Claudia Suarez², Jeimy Martínez^{2, 1}

Resumen:

Avanzar en el conocimiento de la infraestructura verde que compone la ciudad de Bogotá es importante para su manejo. Las plantas presentan respuestas complejas a las condiciones ambientales y sus cambios. En el presente trabajo, se abordó el valor taxonómico y funcional del arbolado urbano de la ciudad de Bogotá. También se evaluó la respuesta potencial del arbolado urbano a escenarios de cambio climático (RCP 2.6 y 8.5 a 2050 y 2070) a través del uso de Modelos Lineales Generalizados (GLM). Finalmente se exploraron redes de interacción entre fauna y flora. En primer lugar, se reconoce la relevancia de la base de datos del SIGAU, como una base fundamental para avanzar en el conocimiento en el contexto de Ciudad. Se encontró un mayor efecto de la diversidad funcional en la mitigación de las Islas de Calor Urbanas. Por otro lado, se evidenció que bajo los escenarios de cambio climático evaluados cerca del 50% de las especies perderán viabilidad climática. También se hizo evidente que hay especies de árboles que tienen un mayor efecto en el establecimiento de interacciones fauna-flora. Finalmente, se reconoce que las especies vegetales tienen un valor diferencial en cuanto a sus características y se aportar de manera muy fina a través de la generación de conocimiento.

Palabras clave:

Infraestructura verde, rasgos funcionales, mitigación, adaptación basada en ecosistemas (AbE), redes ecológicas.

Introducción

1.1. Biodiversidad y su conexión con los servicios ecosistémicos.

La humanidad tiene como tarea fundamental para su sobrevivencia la búsqueda del desarrollo sostenible (34). Esta meta se enfoca en el uso eficiente de los recursos naturales, el incremento de la equidad y el fortalecimiento económico de los países pobres y biodiversos (36). En este contexto es importante el manejo de los socios ecosistemas para maximizar la prestación de servicios ecosistémicos (SE) (29).

La ecología ha pasado de un enfoque basado en diversidad taxonómica (especies) a uno orientado a la diversidad funcional (rasgos) con la finalidad de mejorar la conexión entre biodiversidad y SE (41).

La diversidad funcional (DF) se refiere al tipo, el rango y la abundancia relativa de los rasgos funcionales (RF) que se presentan en una comunidad biológica y determinan su

¹ Biólogo. Correo: manuel.rodriguez@ambientebogeta.gov.co

Ingeniera Forestal. Correo: diana.lara@ambientebogeta.gov.co

Ingeniero Forestal. Correo: rosaura.velandia@ambientebogeta.gov.co

Ingeniero Forestal, diego.alvarez@ambientebogeta.gov.co

Ingeniero Catastral. Correo: richard.gutierrez@ambientebogeta.gov.co

Ingeniera Forestal. Correo: eliana.torres@ambientebogeta.gov.co

Ingeniera Forestal. Correo: jeimy.martinez@ambientebogeta.gov.co

Ingeniera Forestal. Correo: eliana.torres@ambientebogeta.gov.co

Ingeniero forestal: Correo: German.tovar@ambientebogeta.gov.co

Ingeniera Forestal- Subdirectora Silvicultura flora y fauna silvestre. Correo: claudia.suarez@ambientebogeta.gov.co

funcionamiento. La DF es afectada y afecta los motores de cambio global a través de su efecto en los socios ecosistemas (22). Los cambios en el clima, la composición de la atmósfera, el uso de la tierra, el régimen de disturbio y los intercambios bióticos (ej: introducción de especies) todos tienen efectos no aleatorios sobre la DF. Por ejemplo, las especies sensibles a la sequía y las heladas son eliminadas en primer lugar en el contexto variaciones climáticas extremas (14). El enfoque funcional permite la toma de decisiones para la gestión eficiente de la biodiversidad (29). El marco de análisis funcional reconoce las conexiones entre los componentes de la DF y las prioridades sociales de los actores de un territorio (13; 15).

En las ciudades es clave la gestión eficiente del arbolado urbano para maximizar la prestación de SE y mejorar la distribución de estos entre las comunidades (20).

Los árboles urbanos capturan la polución dispersa (gases y partículas), a su vez aportan en la generación de microclimas, regulan la turbulencia del aire y el grado en que la calidad del aire es impactada responde a los RF de las especies. Los RF están siendo utilizados para la selección de árboles en las ciudades europeas con la finalidad de maximizar la prestación de SE (23). En las ciudades se generan islas de calor exacerbando las condiciones climáticas locales, que pueden ser contrarrestadas por la infraestructura verde (35; 40; 46).

Los árboles brindan beneficios (figura 1): económicos (ahorro de energía, valorización de la propiedad, disminución de inversión en infraestructura, captura de carbono), sociales (diminución de la exposición solar, identidad, cohesión, conexión con la naturaleza, espacios para la recreación, bienestar físico y mental). Ambiental (reducción de flujos, regulación de nutrientes, reducción de polución, sombra y refrigeración y hábitat para la biodiversidad) (31).

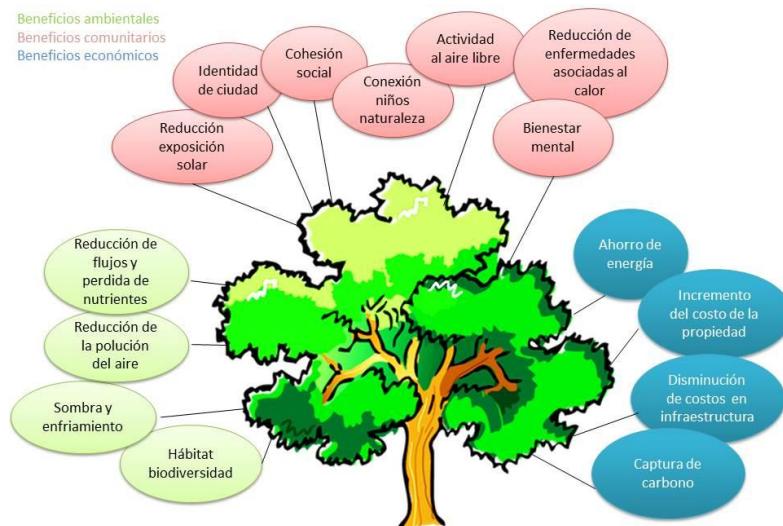


Figura 1. Servicios ecosistémicos prestados por los árboles (Modificado de: Urban Forest Strategy, Australia 2012-2032).

Los árboles de la ciudad de Bogotá son una infraestructura verde que presta diversos SE y tiene impactos sociales ecológicos y ambientales. En este contexto, el objetivo de esta investigación fue: Evaluar el valor taxonómico y funcional (para la conservación de la fauna)

del arbolado urbano de la ciudad de Bogotá D.C y su relación con las islas de calor.

1.2. El cambio climático y su efecto en el contexto de Bogotá-Región.

El cambio climático (CC) es reconocido como una variación estadística en el estado de las variables climáticas (24).

Durante por lo menos 50 años se han evaluado los efectos del CC sobre la biodiversidad a diferentes escalas, y se han evidenciado impactos a nivel de población, especies, comunidad, ecosistema y bioma (6; 32; 33). Se reconoce la presencia de cuatro formas fundamentales para avanzar en el conocimiento: 1) modelos de distribución de especies, 2) aproximaciones desde la paleontología para reconocer las respuestas pasadas al CC y proyectar respuestas futuras, 3) estudios de las respuestas fisiológicas a los cambios en condiciones climáticas y 4) la integración de las anteriores (17).

Se analiza en qué medida se pueden adaptar las ciudades icónicas de todo el mundo en respuesta al CC. En un escenario de clima optimista (RCP 4.5), encuentran que el 77% de las ciudades futuras experimentaran un clima más cercano al de otra ciudad. Además, el 22% de las ciudades experimentará condiciones climáticas no experimentadas por ciudades existentes (3).

Para la ciudad de Filadelfia se evalúa el efecto del CC en función de escenarios RCP, especies con respuestas positivas en diferentes escenarios. Adicionalmente, se reconoce un efecto negativo del CC sobre patógenos que han afectado al arbolado urbano de la ciudad (45) y se encuentra que los efectos de los patógenos son mayores a nivel urbano que periurbano (43).

En la ciudad de Melbourne se evidenció una relación entre la variación climática y el crecimiento radial (31). En un estudio desarrollado para los árboles de las ciudades del estado de California, de las 140 especies de árboles evaluadas, 82 especies se verán afectadas seriamente en escenarios futuros (30).

Se analizan los avances de las instituciones colombianas y se genera una propuesta para un análisis integral de los efectos del CC sobre la biodiversidad (Londoño *et al.*, 2019) y se proponen 5 niveles de análisis: 1) cambio en el ámbito de distribución de las especies, 2) cambios fenológicos, 3) modificaciones morfológicas, 4) modificación de la estructura de las comunidades y 5) modificación de las interacciones bióticas.

A nivel mundial, se viene proponiendo la generación de soluciones al CC en función de la Adaptación basada en Ecosistemas (AbE) (1). Por ejemplo, la ciudad de Melbourne (figura 1) genera la estrategia del bosque urbano que integra seis sub estrategias: 1) Incremento de la cobertura del dosel, 2) Incremento de la diversidad del bosque urbano, 3) Mejoramiento de la salud de la vegetación, 4) Mejorar la humedad del suelo y la calidad del agua, 5) Mejorar la ecología urbana, 6) Informar y consultar a la comunidad para la toma de decisiones (31).

Se evaluó los impactos potenciales del cambio climático sobre especies de árboles y polinizadores presentes en la ciudad de Bogotá D.C, utilizando una aproximación de sustitución del tiempo por espacio.

1.3. Redes ecológicas en el contexto urbano.

Las comunidades biológicas están integradas por poblaciones de especies que comparten el espacio y el tiempo, donde se desarrollan interacciones positivas, negativas y neutras (4). Cada organismo tiene un efecto en su entorno y sobre los otros organismos con los que interactúa de manera directa e indirecta. Se distinguen cinco tipos de interacciones básicas

que corresponden a: competencia, depredación, parasitismo, mutualismo y detritívoros. En este contexto la polinización es un acontecimiento derivado de la floración, la cual responde a estímulos abióticos como la estacionalidad de la temperatura y la precipitación. En la polinización se logra un beneficio mutuo, donde las flores polinizadas ofrecen polen y/o néctar (4).

El beneficio obtenido por la planta corresponde a la polinización o en su defecto la dispersión. Diversos animales han establecido relaciones con las plantas donde se reconocen los insectos, las aves y los mamíferos en especial. Se ha reconocido que la interacción mutualista puede tener efectos importantes en los patrones de distribución de las especies (8; 12) Entre los diferentes tipos de interacción, el mutualismo lleva a un beneficio mutuo (2). El mutualismo planta-animal direcciona la estructuración de las comunidades (42). Los animales son los agentes fundamentales en las dos fases clave de dispersión de las angiospermas, a través de la polinización y la dispersión de semillas (26). También se empezaron a analizar las redes de interacción de los árboles urbano con especies de insectos.



Foto 1. Exploración de rasgos funcionales en la localidad de Puente Aranda.

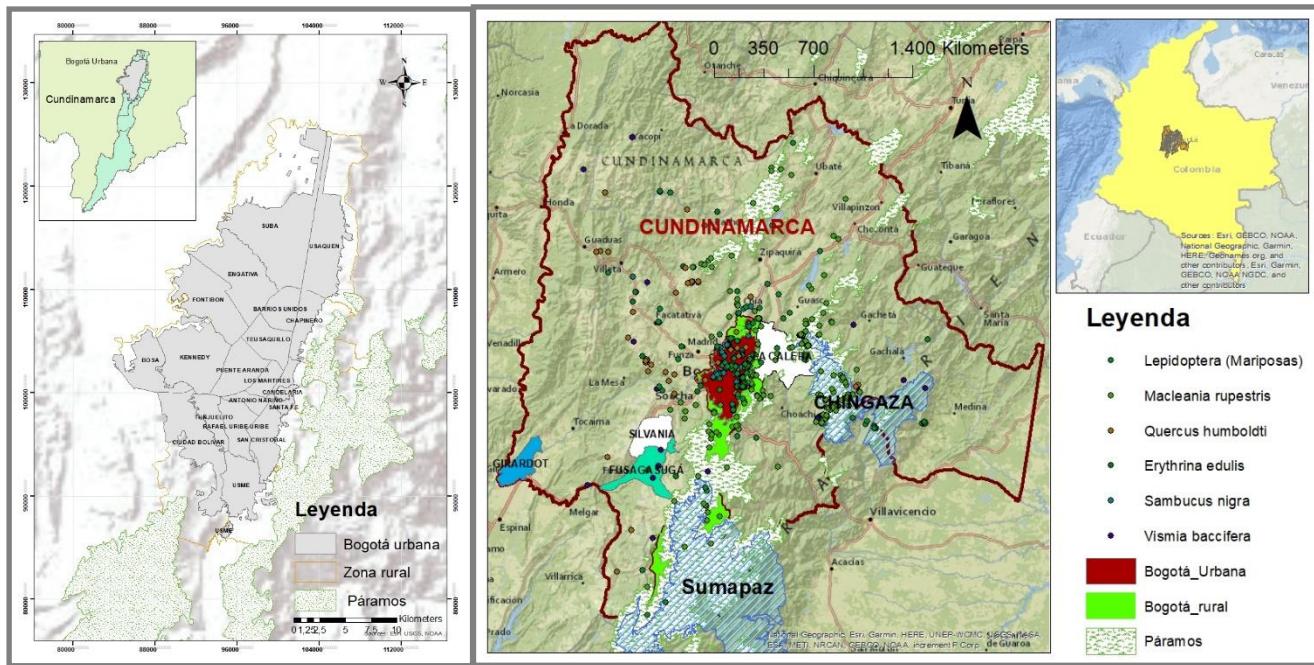
Métodos:

2.1. Área de estudio:

El presente trabajo se abordó en el contexto de Bogotá- región (mapa 1). La base de datos de las características ecológicas (CE) y rasgos funcionales (RF) se construyó para las especies de plantas presentes en el SIGAU y los análisis se desarrollaron a escala de Bogotá Urbana en función de la resolución 228 de 2015 (mapa 1, A).

El proceso de modelación de la distribución potencial de las especies en contexto de cambio climático se generó a escala de Cundinamarca implementando una sustitución de tiempo por espacio y utilizando especies nativas regionales, naturalizadas o con un alto grado de uso (mapa 1, B).

Las interacciones ecológicas se exploraron a escala de individuos para 6 especies (*Ficus americana*, *Lafoensia acuminata*, *Liquidambar styraciflua*, *Pittosporum undulatum*, *Quercus humboldtii* y *Schinus molle*) donde se de alta relevancia tener en cuenta que la información base fue aportada por el Jardín Botánico de Bogotá (JBB).



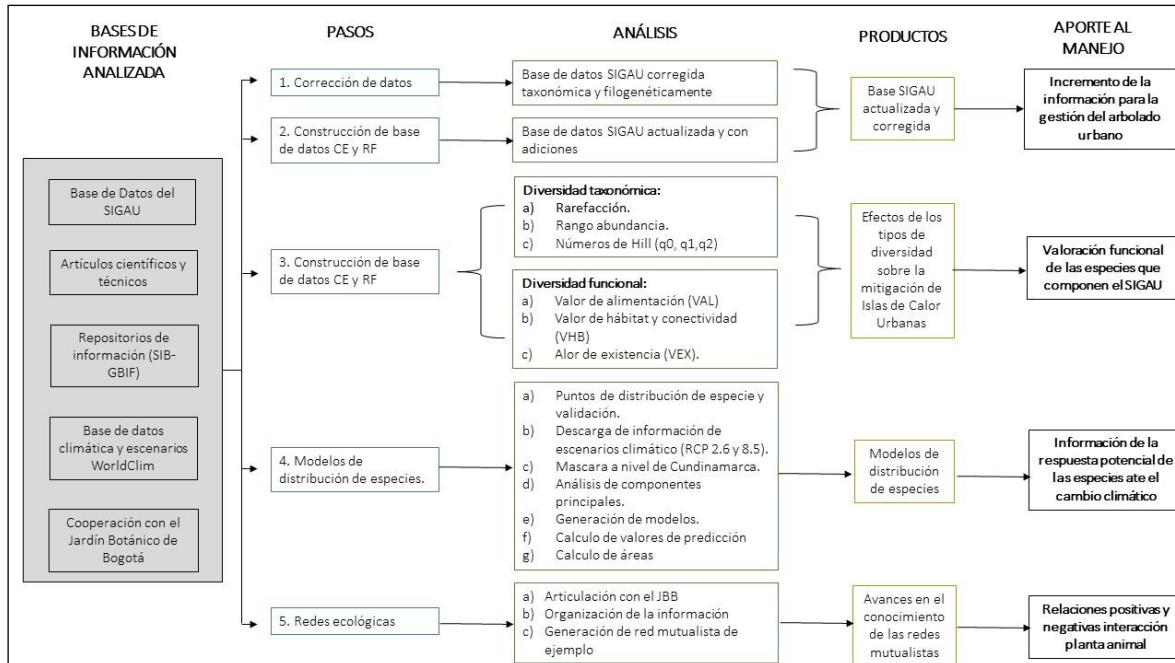
Mapa 1. Escalas de trabajo para abordar los diferentes procesos de investigación. A) mapa de la zona urbana de la ciudad de Bogotá donde se calcularon los indicadores e índices. B) se representa el departamento de Cundinamarca que tiene un gradiente altitudinal que permitió la generación de los modelos de distribución.

El tercer paso, y con los datos de abundancia y riqueza de las especies en la base de datos del SIGAU se desarrollaron análisis de diversidad taxonómica. Paralelamente y con la base de datos generada sobre los CE y los RF.

En el cuarto paso, se generaron modelos de distribución de especies de árboles registrados en el SIGAU para los que se registraron datos de distribución a escala de Cundinamarca, utilizando GLM y una distribución de Poisson

En el quinto paso, y con la colaboración de la subdirección Científica del Jardín Botánico de Bogotá se exploraron redes de interacción planta-animal.

Finalmente, se integró la información generada para dar recomendaciones de manejo.



Resultados:

En la base de datos del SIGAU se registraron 325 morfoespecie de los cuales 282 fueron identificados a nivel de especie. El 32% de las especies requirieron algún tipo de corrección taxonómica. El 9% de las especies son caducifolias, el 33% de estas son superrennifolias y el 58% corresponden a especies perennes. El 6.2% de las especies de arbolado de Bogotá son endémicas, el 3.6% son casi endémicas y el 35.5% corresponde a especies nativas regionales. Por otro lado, el 4.7% son especies naturalizadas, el 44.2% corresponde a especies exóticas de diferentes regiones del mundo y el 5.8% corresponde a especies que han sido reconocidas con potencial invasor. En cuanto a las categorías de amenaza de la UICN 2019, el 69.6% de las especies presentes en el arbolado urbano no han sido evaluadas, el 21.9% corresponde a especies en preocupación menor, el 1.4% son deficientes de datos, el 2.5% están cerca amenaza, el 1.4% son vulnerables, el 2.5% están en peligro y el 0.7% están extintas en vida silvestre.

3.1. Diversidad taxonómica y funcional

Diversidad taxonómica:

Se generó la curva de rarefacción para un muestreo de 35.000 individuos en los censos por cada localidad y se evidencian diferencias marcadas entre estas. De manera general se observan localidades que se acercan al número de máximo rápidamente (Usaquén) y otras localidades que nunca se acercan a la mitad del valor máximo de especies e individuos (Santa fe). Para la interpolación que las especies se acumulan de manera diferencial entre localidades. Para la extrapolación se evidencia que estas pueden ser comparadas ya que se logran la saturación de la curva de acumulación de especies y rangos limitados de variabilidad (figura 3).

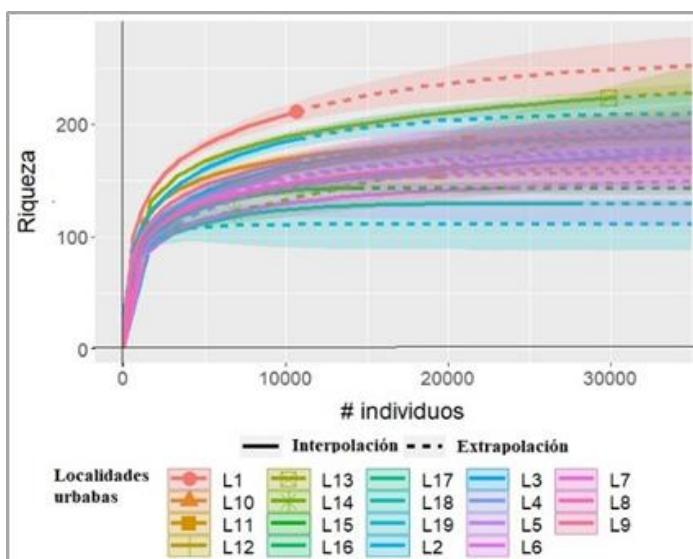


Figura 3. Curvas de rarefacción para las 19 localidades urbanas de Bogotá D:C. L1=Usaquén, L2=Chapinero, L3=Santa Fe, L4=San Cristóbal, L5=Usme, L6=Tunjuelito, L7=Bosa, L8=Kennedy, L9=Fontibón, L10=Engativá, L11=Suba, L12=Barrios Unidos, L13=Teusaquillo, L14= Los Mártires, L15=Antonio Nariño, L16=Puente Aranda, L17=La Candelaria, L18=Rafael Uribe Uribe, L19=Ciudad Bolívar.

Se construyeron curvas de rango-abundancia (figura 4)para evaluar la dominancia,

equitatividad y rareza de las especies presentes en el arbolado urbano. De manera general (A), y para cinco zonas que son centro (B), Estripaciones de los cerros orientales (C), Norte periferia hacia el río Bogotá (D), Occidente (E) y Periferia sur hacia el río Bogotá (F) siguiendo el artículo de Escobedo y colaboradores (2015).

De manera general se evidencian diferencias marcadas en los patrones de diversidad vegetal a lo largo de la ciudad con soporte estadístico. Se evidencia una relación en la calidad del arbolado urbano y la variación socioeconómica a través de la ciudad, donde se reconoce una primera fuente de inequidad en cuanto a la distribución de los beneficios derivados de la biodiversidad.

Se reconoce (figura 4, A) un gradiente de diversidad entre el norte de Bogotá, desde los cerros orientales en dirección al río Bogotá y finalmente hacia la zona sur de la ciudad, donde las localidades centrales presentan valores medios y las del sur son las que presentan valores de diversidad taxonómica menor. Dicho gradiente puede ser explicado, en primer lugar, desde un punto de vista ambiental al existir un gradiente de precipitación desde el norte hasta el sur de la ciudad y por la existencia de un gradiente socioeconómico que se comporta de la misma forma (20).

En la figura 4 (B), para las 6 localidades que componen la zona central de Bogotá, se evidencian diferencias significativas ($p=0.0001$) en cuanto a los patrones de diversidad. La localidad más diversa corresponde a Teusaquillo que presenta una distribución más equitativa de las abundancias y la localidad menos diversa corresponde a Los Mártires presentando un mayor grado de dominancia de pocas especies. En la figura 4 (C), que corresponde a las localidades que colindan con los cerros orientales, elementos fundamentales de la Estructura Ecológica Principal de la Ciudad, no se evidencian diferencias significativas ($p=0.3272$) y un gradiente leve, entre los cerros orientales, Usaquén y Chapinero.

En la figura 4 (D), referida a la zona Norte periferia en interacción con el río Bogotá tampoco se evidencian diferencias significativas ($p=0.2032$) entre las tres localidades que componen el sector con una pérdida progresiva de la diversidad vegetal, desde Suba, hacia Engativá y Barrios Unidos.

En la figura 4 (E), en el sector occidental tampoco se evidencian diferencias significativas, entre las tres localidades, presentando, especies dominantes, baja equitabilidad de las abundancias y grupos de especies raras, con una disminución progresiva de la diversidad desde Kennedy, Fontibón y Bosa.

Finalmente, en la figura 4 (F) correspondiente al sector periferia sur y compuesto por 5 localidades, se evidencian diferencias significativas ($p=0.0019$) entre el grupo más diverso (Rafael Uribe, Tunjuelito y San Cristóbal) y el grupo de menor diversidad (Usme y Ciudad Bolívar).

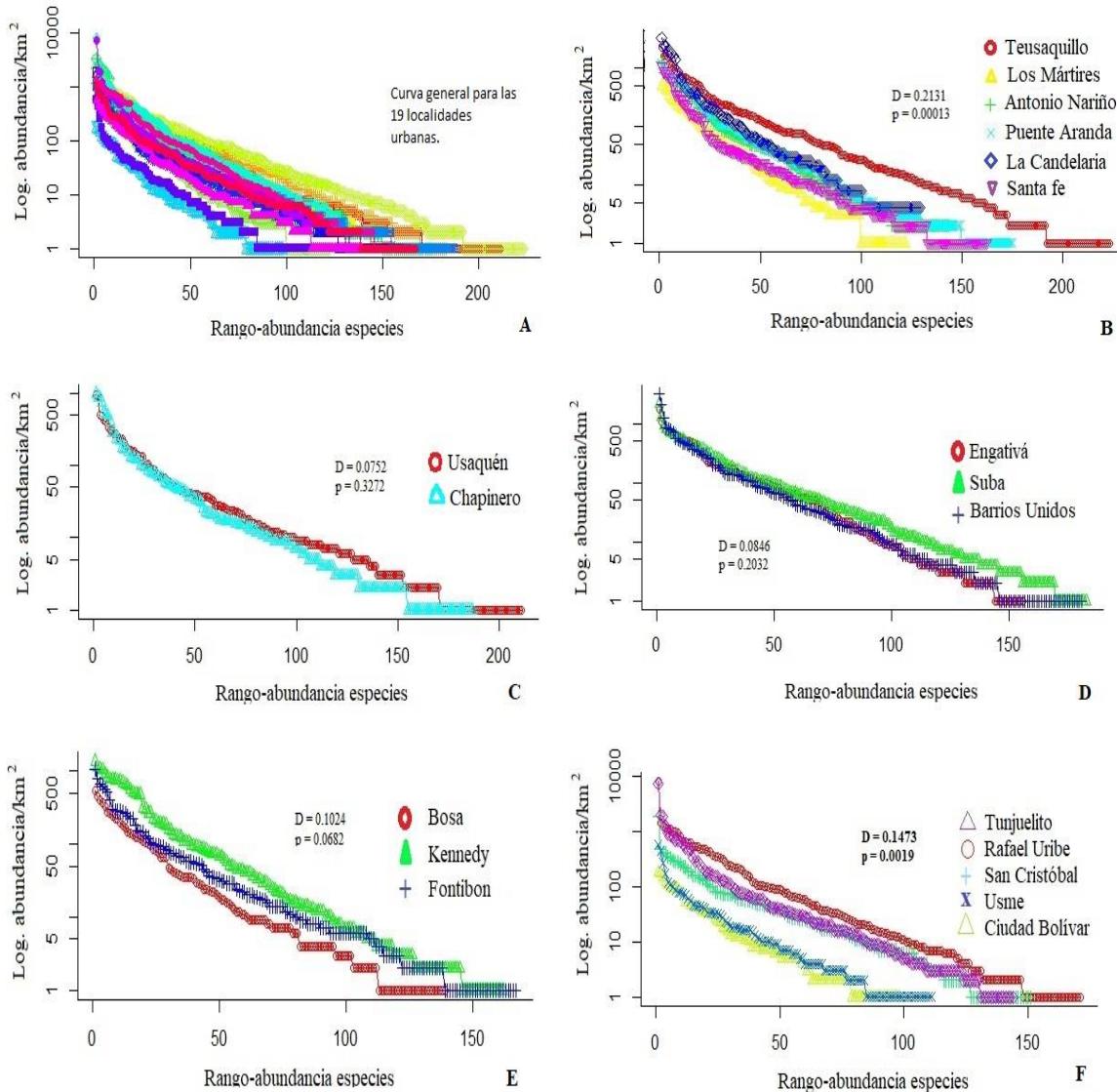
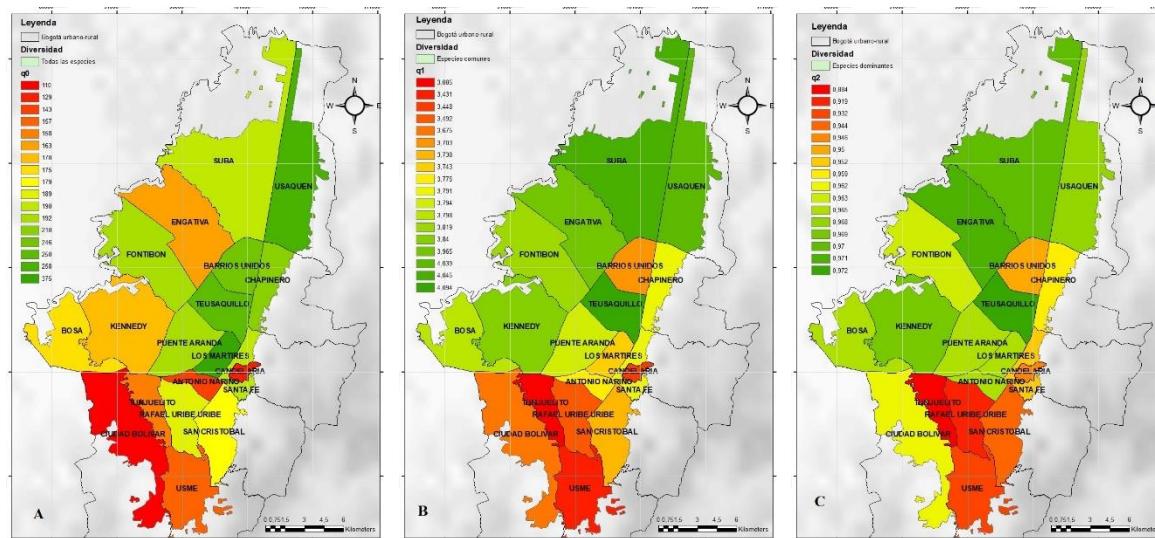


Figura 4. Curvas de rango-abundancia donde se describen los patrones de diversidad para A). contexto general, B). Zona centro, C). Esterbaciones de los cerros orientales, D). Norte periferia hacia el río Bogotá, E). Zona occidente, F). Periferia sur hacia el río Bogotá. Tener en cuenta que las escalas del eje y para las gráficas A y F supera en doble las escalas de las demás graficas.

En el contexto del índice de diversidad q_0 (figura 5, A), basado en todas las especies, las localidades de los Mártyres y Usaquén son las más diversas y las que presentan menos especies compartidas con las demás localidades, así como las localidades que presenta una distribución más equitativa de las abundancias. Localidades como, la Candelaria y Ciudad Bolívar presentan los valores más bajos para este índice. Los valores del índice q_0 se correlacionaron con los valores del efecto isla de calor (EIC) (figura 5, D). Entre estos dos índices se encuentra una correlación negativa muy baja ($R^2 = 0,0224$), donde cerca del 20% de la variación determinada por la isla de calor es explicada por todas las especies. Es decir, no todas las especies están aportando de la misma manera a la atenuación del efecto isla de calor (11).

Para q1 (figura 4, B), con base en especies comunes se evidencia un cambio en los patrones de diversidad. Teusaquillo y Suba se reconocen como las localidades más diversas y a su vez las localidades que comparten mayor número de especies con las otras localidades. En este contexto Usaquén sigue siendo una localidad especial ya que beneficia un mayor número de especies no compartidas con otras localidades lo cual puede tener un efecto positivo en la conectividad al estar en interacción con zonas rurales, así como al estar en interacción con la Reserva de los Cerros Orientales de Bogotá. En este contexto localidades como Usme decaen rápidamente de un valor medio-bajo a un valor muy bajo de diversidad, lo cual indica que, aunque no es muy diversa está beneficiando a especies poco comunes, patrón también evidente en las localidades como Santa Fe y Chapinero. Se evidencia un valor de correlación ($R^2 = 0,3072$) mayor a la correlación entre el índice basado en especies comunes y el EIC. Lo anterior evidencia que especies comunes o con abundancias medias a altas pueden tener un efecto mayor que el mayor número de especies dominantes, así como un bajo número de especies raras (figura 5, E).

Finalmente, al evaluar el índice de diversidad para las especies dominantes (figura 5, C), las localidades como Suba, Engativá, Kennedy y Ciudad Bolívar incrementan su valor, donde se reconoce que el arbolado urbano de estas localidades está siendo dominado por pocas especies. El valor del índice decrece para la localidad de Usaquén, Usme, San Cristóbal y Rafael Uribe Uribe lo cual evidencia que esta especie tiene una distribución más equitativa de las abundancias y se esperaría que en cuanto a diversidad funcional adquiera los mayores valores. Los estudios en ecología proponen el uso de las especies dominantes para reconocer el comportamiento de las comunidades vegetales y/o animales en sistemas naturales. Se evidencia que a nivel de ciudad y dada la estructuración de las comunidades es ideal trabajar con las especies comunes. Se evidencia un valor de correlación ($R^2 = 0,2452$) mayor entre el índice basado en todas las especies y el EIC, así como un valor menor de correlación al índice basado en las especies comunes.



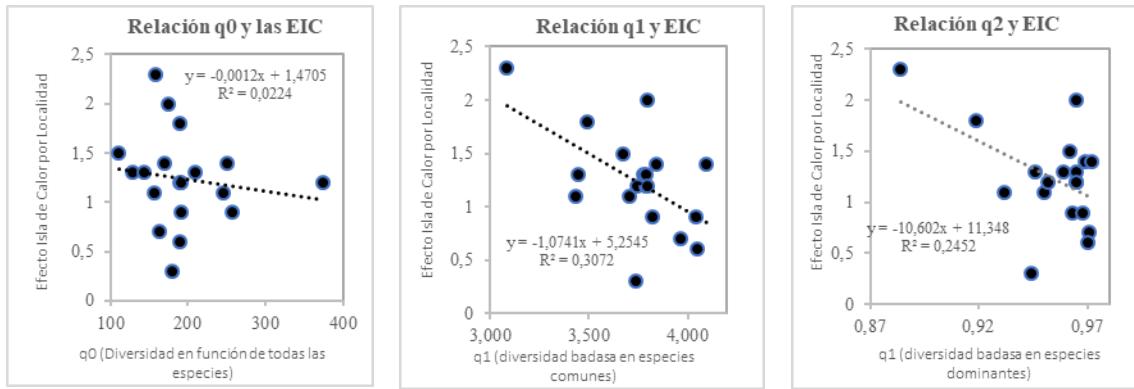


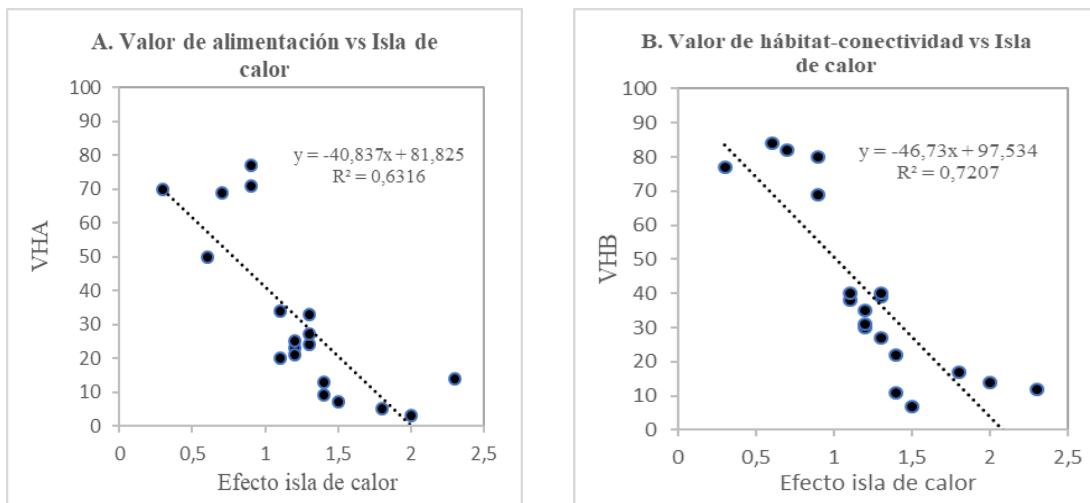
Figura 5. Comportamiento de los índices de diversidad taxonómica (A, B y C) a través de las 19 localidades urbanas de Bogotá (q0= diversidad basada en todas las especies, q1=diversidad basada en especies comunes y q2=diversidad basada en especies dominantes y correlación entre cada índice con los valores de las islas de calor por localidad (D, E, F).

Diversidad funcional

Valor de Importancia para la Alimentación (VAL), donde el 47% ofrecen frutos para fauna, el 72% ofrecen provisión de semillas para fauna, el 26% de las especies presentan evidencia de alimentación de fauna con sus hojas y el 78% de las especies producen recursos florales que pueden ser relevantes para la alimentación de polinizadores urbanos.

Valor de Hábitat y Conectividad (VHB), donde se reconoció que el 57% de las especies presentan una copa densa que puede tener un efecto positivo en la provisión de hábitat y conectividad, así como en la disminución del efecto isla de calor. El 46% de las especies del arbolado tienen la posibilidad de volverse árboles de gran porte y aportar a la prestación de servicios ecosistémicos desde diferentes enfoques.

Valor de Existencia (VEX), donde El 62% de las especies son especies pioneras y/o adquisitivas y el 38% pueden ser especies conservativas o especies que en los bosques naturales se ubican en los bosques maduros. El 64% corresponde a especies son monoicas y/o hermafroditas y el valor restante son especies dioicas.



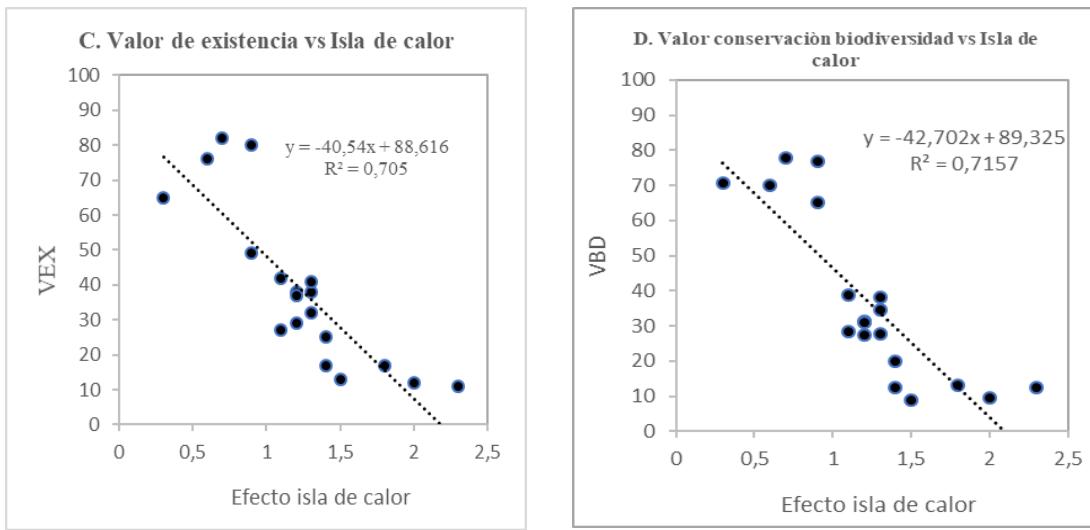


Figura 6. Correlación entre los tres índices de diversidad funcional y el índice de valor para la biodiversidad con el efecto isla de calor. VAL= Valor para la alimentación, VHB= Valor de hábitat y conectividad, VEX= Valore de existencia para la biodiversidad y VBD= Índice de valor para la conservación de la biodiversidad .

Como se observa en la figura 6, los índices de diversidad funcional se comportan de manera diferente a los índices de diversidad taxonómica. Se obtiene que los valores de correlación entre la diversidad funcional y el efecto de isla de calor es mucho mayor e inverso, es decir al incrementar el valor de la diversidad funcional disminuye el efecto de isla de calor para todos los casos. El índice VHB es el que muestra valores mayores de correlación, evidenciando que las características de la vegetación asociadas con la prestación de hábitat como la perennidad del follaje y la densidad de la copa puede mitigar en mayor proporción las islas de calor. En este contexto se reconoce la relevancia de profundizar en el estudio de la diversidad funcional, más allá de la diversidad taxonómica.

3.2. Efectos potenciales del cambio climático en el contexto de Bogotá-región.

Se recopilo la información para 182 especies de fauna y flora y se logró la modelación de 140 especies.

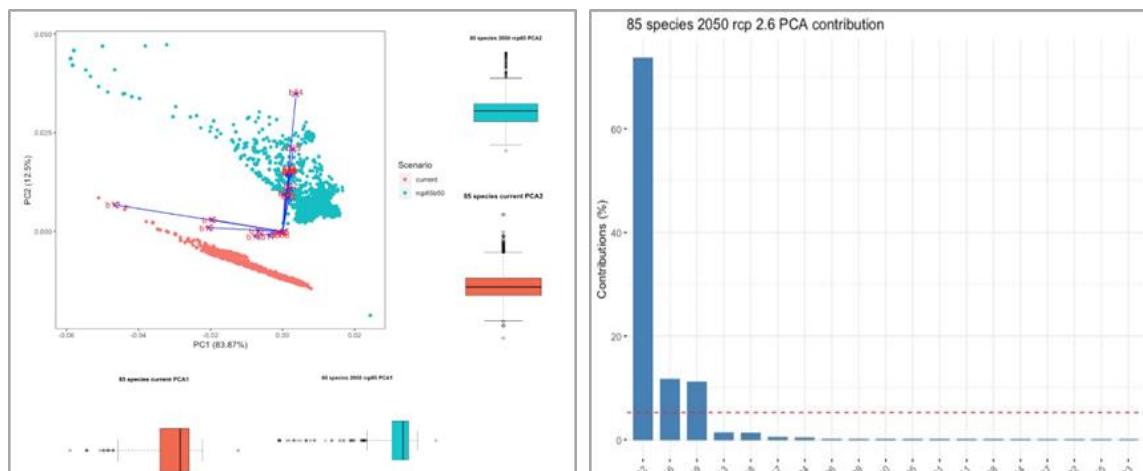


Figura 7. Ejemplo de A) análisis de componentes principales (PCA) que muestra la variación en las variables bioclimáticas para el escenario RCP 2.6 para 2050 y B) histograma que muestra el aporte de cada variable bioclimática.

Se exploró el efecto que tienen las variables bioclimáticas en la definición del nicho climático y como se muestra en el histograma (figura 7), estas variables corresponden a: Precipitación anual (BIO 12), Precipitación del trimestre más húmedo (BIO 16) y Precipitación del trimestre más frío (BIO 19).

Como se evidencia en la figura 8, se observa una relación logarítmica ($r^2=0,83$) entre los valores de puntos de presencia registrados en GBIF y la capacidad del modelo de predecir el NC de cada especie. Especies con un mayor número de registros tienen mejores predicciones de los modelos.

Grupo	Modelos	Respuesta + en Bogotá
Plantas	112	27
Colibríes	10	2
Abejas	5	0
Mariposas	13	0
Moscas	2	0
Intentos	40	NA
TOTAL	182	29

Tabla 1. Exploración de modelos de distribución par especies de flora y fauna que se encuentran en la ciudad de Bogotá D.C.

De la base de datos del SIGAU depurada se modelo la distribución de 109 especies de plantas. Adicionalmente, se modelaron tres especies más correspondientes a *Oreopanax bogotense*, *Erythrina edulis* y *Thunbergia alata*, la primera con distribución posible para Bogotá, la segunda con distribución natural máxima hasta los 2.000 m.n.m y la tercera, aunque no es una especie de árbol, corresponde a una especie de planta con potencial invasor en la ciudad.

Adicionalmente se seleccionaron 10 especies de Colibrís (Familia: Trochilidae) para las cuales se obtuvieron modelos a nivel de especie. Las Abejas (Orden: Hymenoptera), Mariposas (Orden: Lepidoptera) y Moscas (Orden: Diptera) de las Flores se modelaron a nivel de ensamblaje.

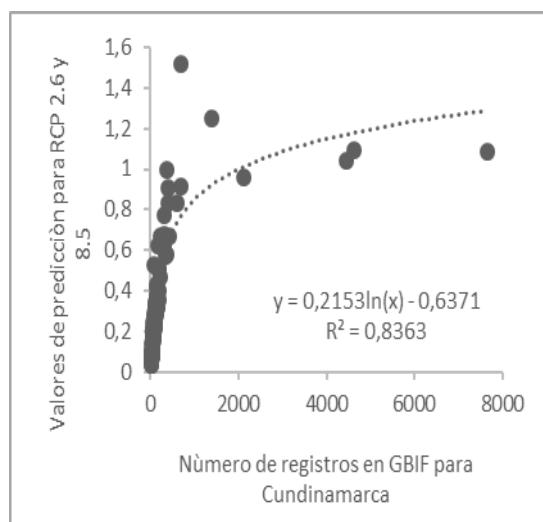


Figura 8. Relación logarítmica entre el valor promedio de los valores de las predicciones para los modelos de distribución potencial.

Efectos generales:

Como se observa en la figura 9, hay una tendencia a nivel de Bogotá-región donde cerca del 30% de las 142 especies-ensamblajes presentan tendencia a la mejora del NC. También se evidencia que un valor del 15% de las especies mantendrá un ámbito de distribución estable, así como las probabilidades de presencia de las especies se mantendrán a través del tiempo. Bajo todos los escenarios y lapsos de tiempo hay una probabilidad de que entre el 1 y el 2 % de los NC desaparezcan.

En el contexto de un escenario optimista RCP 2.6, más del 50% de las 142 especies-ensamblajes modelados presentan un deterioro del nicho climático bajo este escenario. Para 2050 cerca de 45% de las especies presentaran un deterioro alto en la probabilidad de permanencia del nicho climático, así como en su ámbito de distribución. Dicha probabilidad de deterioro incrementara para 2070. En cuanto las probabilidades medias y bajas estas disminuyen equiparando del deterioro sobre los NC de las especies.

En el contexto de un escenario pesimista RCP 8.5, más del 48% de las 142 especies-ensamblajes modelados presentan un deterioro del NC bajo este escenario. Los efectos evidenciados por este escenario son inferiores a los presentados por escenarios más optimistas, lo anterior evidencia la complejidad del mantenimiento del NC, donde es clave el manejo de la infraestructura verde es determinante para potenciar el mantenimiento de sistemas integrales y funcionales. En este contexto, es clave reconocer el efecto de la biodiversidad asociada y las interacciones, así como el potencial de la conectividad en paisajes multifuncionales.

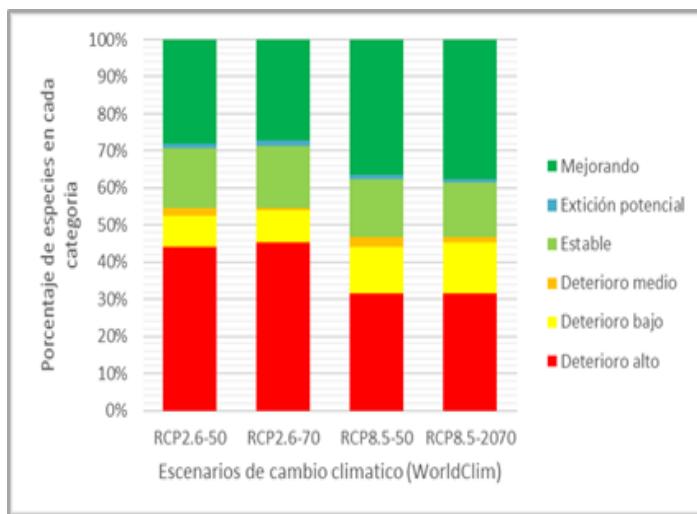
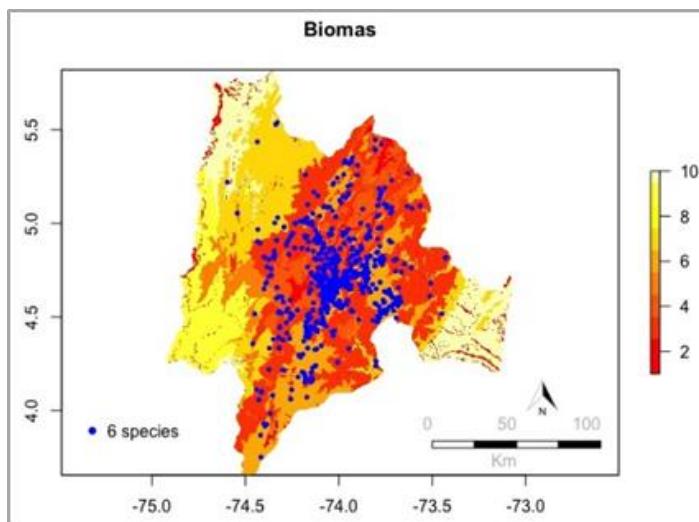


Figura 9. Cambios potenciales en función de los escenarios y períodos de tiempos analizados para los GML para todas las especies.

Efectos a nivel de biomas:

Para 6 especies con altos valores de predicción se estimó la respuesta integrada frente al CC. Como se observa en mapa 2, las zonas donde se evidencia un mayor efecto sobre la probabilidad presencia de las especies y los ámbitos de distribución corresponden a tierras

bajas hacia la vertiente hacia la magdalena. En este contexto el oro bioma andino y el páramo serán menos afectados evidenciando un desgaste biótico en tierras bajas y una oportunidad para que la ciudad aporte al manejo de la infraestructura verde a nivel de región (38).



Mapa 2. Efectos a nivel de bioma del cambio climático para 6 especies con valores altos de predicción (amarillo: mayor densidad de cambio, rojo: menor densidad de cambio).

Efectos en los polinizadores:

Las abejas (Orden: Hymenoptera) son un ensamblaje funcional de alto valor en los procesos de polinización de plantas que han mostrado un declive mundial (44). En el contexto de un escenario de CC RCP 2.6 para 2050 se observa una reducción en la probabilidad del NC para el ensamblaje. Adicionalmente se evidencia en el contexto de un buffer de 30 kilómetros para la ciudad de Bogotá una homogenización en los ámbitos de distribución para estas especies (figura 10).

Los colibríes (Familia: Trochilidae) son una familia de aves especializada en un dieta nectarívora e insectívora que se caracterizan por tener diferentes estrategias de alimentación, desde especies muy especialistas hasta especies muy generalistas y que incrementan su diversidad al incrementar la diversidad de vegetación nativa y disponibilidad de hábitat. En el contexto de escenarios de cambio climático RCP 8.5, estas especies responden positivamente en el contexto de la ciudad de Bogotá Región incrementando a la probabilidad de presencia de NC.

Otro de los grupos de polinizadores de alta relevancia encuentra las mariposas y polillas (Orden: Lepidoptera), las cuales pueden asociarse con plantas a través de una relación mutualista como la polinización o a través de una relación de depredación de las plantas en el estado larval. En el contexto de un escenario RCP 8.5 se perderá la viabilidad climática para el ensamblaje en el contexto de Bogotá-región. Es relevante anotar que para los insectos se evidencia un mayor efecto de los escenarios climáticos. Lo anterior puede estar influenciado por la baja disponibilidad de información que se tiene para insectos.

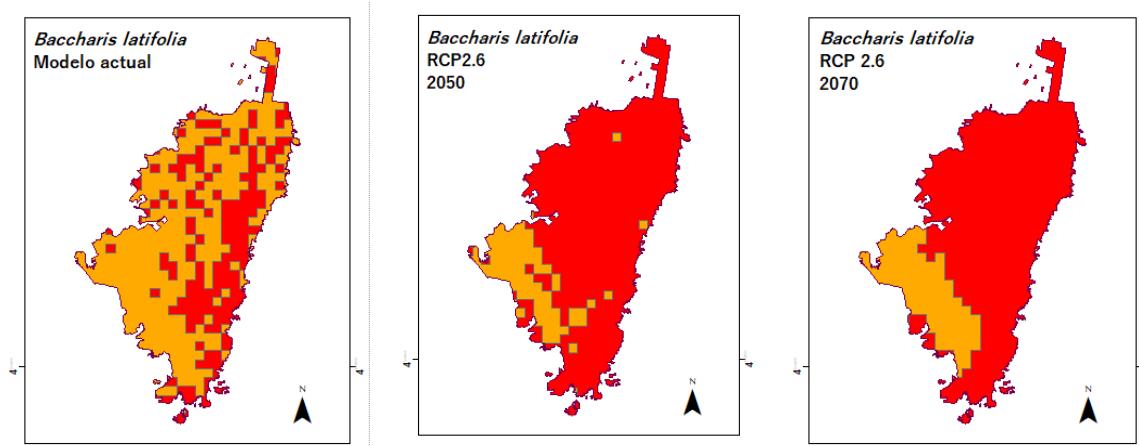
En este contexto se evidencia que diferentes grupos pueden responder de manera diferentes a las condiciones de un clima cambiante, y progresivamente los efectos sobre un grupo, ensamblaje y/o especie pueden desencadenar efectos sobre otro grupo, ensamblaje, especie o hasta población y/o comunidad.

Las plantas que se encuentran en la ciudad de Bogotá son una combinación de especies nativas locales, regionales, naturalizadas y exóticas. Al evaluar la disponibilidad del NC en la ciudad, ninguna de las especies presenta probabilidades muy altas de disponibilidad, sin embargo, las especies se mantienen a través de acciones de manejo. Es así como muchas especies van a tender a disminuir su NC. Sin embargo, al manejar las especies en función de la variación de las condiciones ambientales que determinan su capacidad de adaptación puede permitir la disminución de costos por manejo, la capacidad de adaptación y resistencia a las condiciones locales. En este contexto se recomienda lograr incluir en la generación de modelos de distribución potencial de especies otras variables adicionales a las climáticas a escalas de mayor resolución que permitan continuar en la definición de las especies que puede o no ser de fácil adaptabilidad en el contexto de la ciudad y la región.

Cerca de 49 especies de las 109 modeladas, presentan buena capacidad de adaptación al CC en función de los escenarios evaluados. Estas especies corresponden en su mayoría a especies nativas con excepción de *Acacia decurrens*, *Acca sellowiana* y *Callianthe striata*. De las 22 especies endémicas nacionales que se incluyen el SIGAU, 14 especies se adaptaran positivamente a la mayoría de los escenarios climáticos, donde se recomienda poner atención a la capacidad adaptativa de las especies en el contexto de los bosques andino y zonas de páramo.

El 71% de las especies con efecto positivo presentan vacíos de información, así como el 63% de las especies nativas. Se recomienda incrementar el desarrollo de conocimiento que permita mejorar la gestión del arbolado urbano.

En el contexto de Bogotá (figura 11) se presentan 3 ejemplos de cómo varían los ámbitos de distribución para 3 especies del arbolado urbano. Las respuestas en todos los casos son negativas, lo cual es el patrón general que se presentan para la flora de la ciudad. Sin embargo, polinizadores como colibríes incrementaran sus patrones de distribución a nivel de Bogotá-región. Posiblemente especies polinizadas y dispersadas por plantas puede tener mayor viabilidad en el contexto de dichos escenarios.



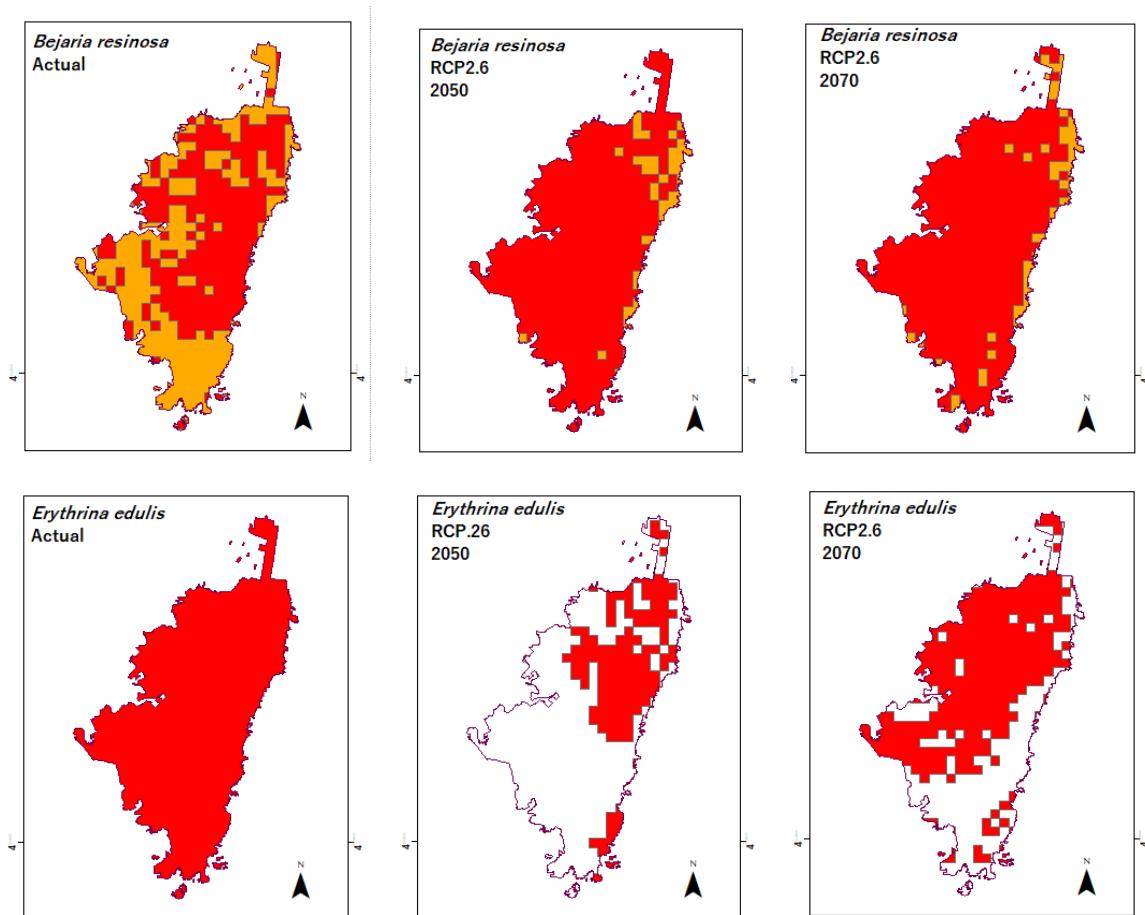


Figura 11. Modelos ejemplo de distribución de especies para en el marco de un escenario RCP 2.6 para 2050 y 2070 para la zona urbana de la ciudad de Bogotá (A. modelos de distribución actual y B y C. modelo de distribución futuro).

3.3. Exploración de las redes mutualistas

Con información provista por el Jardín Botánico de Bogotá se inició un proceso de evaluación de las redes mutualistas para avispas (Hymenoptera) donde se determinaron diferentes especies y morfoespecies de abejas polinizadoras como *Apis mellifera* y especies patógenas de semillas como *Megastigmus transvaalensis*. Se exploró dicha interacción para 6 especies de árboles que corresponden a: *Lithraea molleoides* (Falso pimiento), *Ficus americana* (Caucho sabanero), *Quercus humboldtii* (Roble), *Liquidambar styraciflua* (Liquidámbar), *Gardenia jasminoides* (Jazmín del cabo) y *Lafoensia acuminata* (Guayacán de Manizales).

De manera general se evidencia una red de interacción anidada, con especies mutualistas que interactúan entre sí y especies de avispas especializadas que interactúan con una u otra especie de especies de plantas. En este contexto se evidencia que efectos de CC sobre especies como el Falso pimiento o el Roble pueden tener un efecto determinante sobre la red ecológica que se propone. Por ejemplo, el Roble perderá viabilidad climática en el contexto del CC pero la red mutualista puede mantener la capacidad de adaptación para las especies asociadas. Por otro lado, hay varias especies o morfoespecies que son más especialistas del Guayacán de Manizales y pueden perder viabilidad climática en el contexto de cambio en variables bioclimáticas.

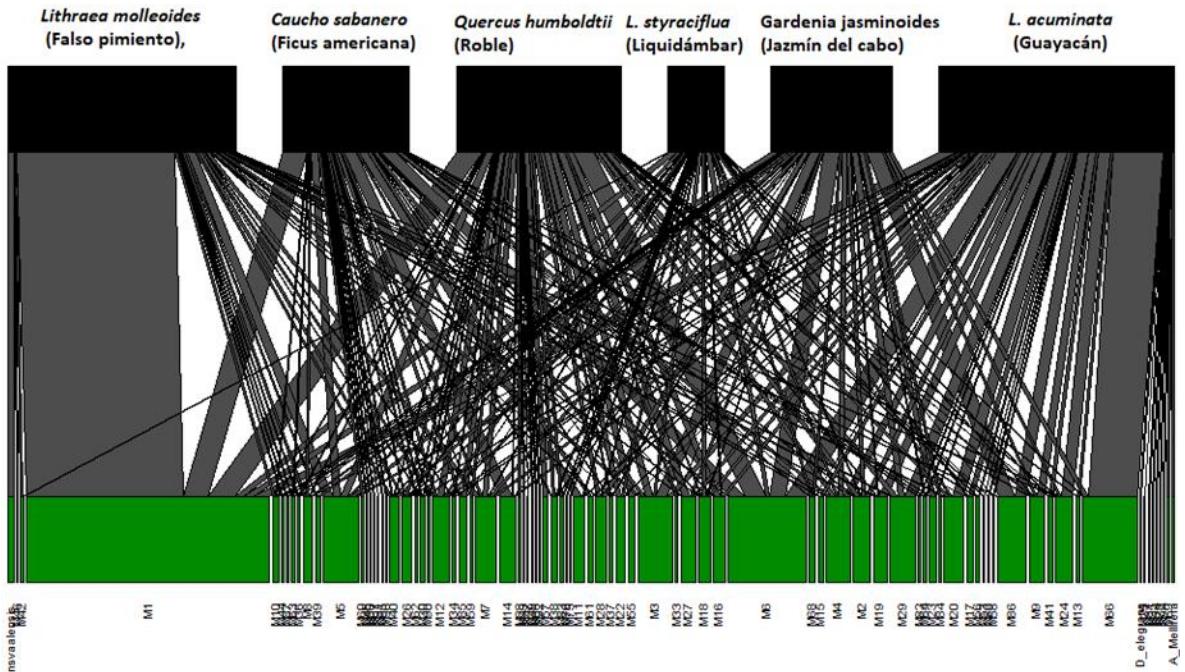


Figura 11. Red mutualista entre 6 especies de plantas (color negro) y cerca de 80 especies de himenópteros (color verde).

Discusión:

En primer lugar, se evidencia que el arbolado de la ciudad de Bogotá presenta una elevada riqueza de especies con diversas características ecológicas y rasgos funcionales. Adicionalmente, la infraestructura verde de la ciudad esta compuesta por especies nativas y exóticas que complejizan tanto a la diversidad taxonómica y funcional, así como los requerimientos de su manejo. Se propone maximizar la prestación de servicios ecosistémicos a través de la selección de rasgos funcionales que permitan lograr un balance entre los servicios ecosistémicos que son requeridos a mediano plazo (25).

En cuanto al estado de conservación, se evidencia que para la mayor proporción de las especies no se tiene información para la evaluación de su estado de conservación, pero se avanza en el desarrollo de conocimiento para el manejo en el contexto de la ciudad y se reconoce a la ciudad como un espacio abierto para el desarrollo de investigación. Por otro lado, el arbolado urbano incluye especies en diferentes categorías de amenaza mundiales (IUCN, 2019) y/o locales, donde las acciones de manejo, el desarrollo de conocimiento y la planificación del arbolado urbano pueden aportar a su conservación.

Por ejemplo, es clave reconocer las dinámicas de las especies que ocasionan enfermedades al arbolado urbano, sus ciclos biológicos (incluyendo el conocimiento sobre vectores), las estructuras de las redes mutualistas en las que participan y los impactos potenciales del cambio climático (21). También se reconoce la relevancia de incrementar el conocimiento sobre especies invasoras y los efectos en la degradación de los sistemas naturales o manejados. Otra posibilidad para avanzar en el desarrollo de información está enfocada en reconocer los cambios morfológicos que a su vez se pueden caracterizar como rasgos funcionales. También es relevante determinar cambios a nivel de estructura de las comunidades y la modificación de las interacciones bióticas (27). La gestión de conocimiento de biodiversidad es clave y Colombia cuenta con el SIB, donde todas las

instituciones públicas y privadas deben participar en su desarrollo.

Al evaluar la diversidad taxonómica por localidad, se observa que hay diferencias marcadas entre las localidades en cuanto a la riqueza de especies como al número de árboles. Lo anterior lleva a la disminución en los servicios ecosistémicos a los que tienen derecho todos los ciudadanos (20). Al evaluar las curvas de rango abundancia, las diferentes localidades actúan como diferentes tipos de comunidades vegetales, las cuales pueden orientarse a mejorar la distribución de los servicios ecosistémicos o se pueden aprovechar las especies individuales para maximizar la prestación de estos.

Al evaluar el efecto de la diversidad taxonómica en la disminución del efecto isla de calor, se evidencia que diferentes componentes de la diversidad taxonómica aportan de diferente manera en la atenuación de dicho efecto. Se evidencia que las especies comunes (abundancias intermedias) están presentando un mayor efecto en la atenuación del EIC, donde estas especies al tener abundancias medias presentan un mayor efecto en la expresión de sus rasgos funcionales e indican la importancia de incrementar la abundancia de especies raras y disminuir la abundancia de las especies más dominantes (46).

Es relevante avanzar en la caracterización funcional de las especies de árboles, arbustos, lianas, hierbas, así como de especies de fauna en el contexto de la ciudad. En el presente trabajo se presenta una base de datos que parte de una revisión comprensiva de publicaciones sobre características ecológicas y rasgos funcionales que pueden ser completadas con bases de datos mundiales (28), pero que a su vez pueden llevar a la resolución de diferentes preguntas de investigación con aplicación al manejo. Se entrega la base de datos del SIGAU, revisada taxonómica y filogenéticamente, con la inclusión de características ecológicas y rasgos funcionales que puede ser alimentada y utilizada para el desarrollo de nuevas preguntas de investigación (9).

Contrarrestar la diversidad taxonómica y la diversidad funcional es un ejercicio positivo para el manejo de una ciudad, ya que permite la selección de especies más allá del origen de estas en función de maximizar los beneficios derivados del manejo de dicha infraestructura urbana (7). En el presente trabajo se evidencia una mayor relación entre la diversidad funcional y la atenuación del efecto isla de calor, donde los índices empleados manifiestan la necesidad de profundizar en el conocimiento de los rasgos funcionales para evaluar diferentes beneficios requeridos. Por ejemplo, es necesario tener claridad del área foliar, para evaluar la capacidad de captura de material particulado producto de la polución (23).

se hace relevante evaluar las oportunidades en el contexto de ciudad para mejorar la conectividad funcional que beneficie la dispersión de especies de fauna de interés y diversifique la oportunidad de nichos para dicha biodiversidad (39). Adicionalmente se ha reconocido que el mejoramiento del arbolado urbano disminuye la probabilidad de evolución de nuevos patógenos y presenta efectos positivos en un clima cambiante (47).

Finalmente, es importante generar una interacción entre la investigación y el manejo que permitan contrarrestar los efectos del cambio climático (19), maximizar la prestación de servicios ecosistémicos como: refrigeración y atenuación del efecto isla de calor, regulación hídrica, filtración, captura de material particulado, efectos sobre la biodiversidad e incrementar el aporte social del mismo (18).

Se da el primer paso del conocimiento del impacto del cambio climático sobre la biodiversidad a nivel del nicho climático, evaluando impactos de escenarios climáticos sobre el arbolado y polinizadores asociados.

En este contexto se reconoce la relevancia de generar información sobre la fenología (floración, reproducción de individuos y migración) de las especies en el contexto de la

ciudad, lo cual puede afectar a las especies como tal y a las interacciones ecológicas en las que participan (33).

Se ha reconocido, que las redes ecológicas son más sensibles a la perdida de las plantas que de los animales en el contexto del cambio climático (37). Para Bogotá D.C, se evidencia un efecto negativo para las especies de plantas modeladas, lo cual puede generar un efecto en cadena para las especies de fauna que dependen de dichas plantas. Es relevante reconocer que la ciudad ofrece hábitat y alimento para diferentes especies de su biodiversidad como por ejemplo especies migratorias de aves y otras que pueden ser afectadas. Adicionalmente, es importante reconocer que la biodiversidad se dentro de la ciudad se ve afectada por las actividades que se desarrollan dentro de estas, por ejemplo, la actividad de las aves se puede verse afectada por la luz artificial que se produce en las ciudades (16).

El arbolado urbano de Bogotá responde en mayor medida al manejo que a la adaptación a un NC. Aunque se evidencia a través del análisis de la información derivada de los resultados de los modelos que diferentes especies pueden responder de manera diferente (disminución-incremento de la viabilidad), una estrategia importante de adaptación, es orientarse a las especies que mejor responde y utilizar el manejo en el contexto de la ciudad para aportar a la conservación de especies altamente impactadas por los escenarios climáticos. Desde este enfoque y con una visión de Bogotá-región se considera eficiente una planificación articulada a través del territorio de Cundinamarca sobre la infraestructura verde de la ciudad, ciudades pequeñas, pueblos y demás, así como de las áreas de conservación nacional y regional con un enfoque en conectividad estructural y funcional.

Todo lo anterior plantea necesidades y oportunidades para la mitigación y la adaptación en el contexto climático. Se reconoce la Adaptación Basada en Ecosistemas (AbE) o en Naturaleza o basada en naturaleza, la cual describe un proceso en el que los sistemas socio ecológicos apuestan a maximizar la prestación de servicios ecosistémicos en el contexto de las ciudades, sistemas agroecológicos y en el ámbito de región que incluyen los sistemas de áreas protegidas (1). En este contexto, el uso de vegetación para el arbolado de la ciudad en función de sus características funcionales puede maximizar los beneficios derivados de la adaptación basada en ecosistemas a diferentes escalas. Por ejemplo, a escala de isla de calor el establecimiento de la vegetación y la priorización de características eficientes para la amortiguación de dichos impactos puede generar impactos positivos (11) o a escala de paisaje se puede propiciar la conectividad y la conservación de la biodiversidad asociada con la prestación de otros servicios ecosistémicos, como la provisión de recurso hídrico.

Como se observó en el estudio, el CC forzara a las especies a desplazar sus ámbitos de movimiento, pero dicho proceso dependerá de la capacidad de dispersión (asociada a la interacción), el tiempo con el que se cuente, las barreras naturales o antrópicas y las acciones de manejo que se implementen. En este contexto, no solamente migraran o colonizaran especies sino también rasgos funcionales. Se recomienda a la Secretaría Distrital de Ambiente, evaluar rangos funcionales de interés como: densidad de la madera, tamaño del árbol adulto, área específica foliar, contenido foliar de nitrógeno y otros que permitan modelar los efectos del cambio climático sobre los mismos y de esta manera incrementar la información para el manejo (5).

Conclusiones:

Es importante incrementar el conocimiento de la infraestructura verde desde el punto de vista de la diversidad funcional estableciendo un vínculo con los servicios ecosistémicos para aportar al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Bogotá se establece en el contexto de un paisaje andino, donde los procesos (ecológicos, sociales y económicos) en la ciudad son el resultado de la interacción directa en un paisaje andino multifuncional.

Es un derecho el acceso a una infraestructura ecológica eficiente para responder de la mejor manera a las dificultades impuestas por el desarrollo urbano.

No es factible satanizar a las especies exóticas en el manejo del desarrollo urbanísticos, pero es relevante el desarrollo de conocimiento enfocado a enlazar la diversidad con la prestación de un servicio ecosistémico que permita tomar decisiones informadas.

Es Importante la consolidación de información (SIGAU) para mejorar los procesos de modelación.

Bogotá presenta una tendencia a la disminuir la precipitación y a la homogenización del clima, es relevante avanzar en procesos tanto de mitigación como de adaptación.

Los impactos del clima en las plantas afectan las redes mutualistas en mayor proporción.

Evaluar cambios morfológicos (efecto funcional) e implementación de un sistema de monitoreo sobre la fenología.

Profundizar en el estudio de la diversidad funcional permite precisar acciones de manejo y mejoramiento de la infraestructura verde.

Agradecimiento:

Se agradece a la ingeniera Claudia Suarez Poblador, el ingeniero German Tovar y a la SDA por la oportunidad para desarrollar este tipo de conocimiento. También se agradece a Juliana Duran y al grupo de investigación del JBB por poner a la disposición de contribuir con datos para analizar el valor de las redes mutualistas.

Referencias:

1. Álvarez Grueso, E., Florian Buitrago, M., Peñuela Zamudio, L., & Cortés Ospina, E. (2018). AbE Guía de adaptación al cambio climático basada en ecosistemas de Colombia. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/ABE/_MADS_Guia_AbE_LIBRO_Digital-Cambio.pdf.
2. Bascompte, J., & Jordano, P. (2007). Plant-Animal Mutualistic Networks: The Architecture of Biodiversity. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 38(1), 567–593. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095818>.
3. Bastin, J.-F., Clark, E., Elliott, T., Hart, S., van den Hoogen, J., Hordijk, I., ... Crowther, T. W. (2019). Understanding climate change from a global analysis of city analogues. PLOS ONE. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217592>.
4. Begon, M. (2014). Ecología: Individuos, Poblaciones y Comunidades. Barcelona: Editorial Omega.
5. Bender, I. M. A., Kissling, W. D., Böhning-Gaese, K., Hensen, I., Kühn, I., Nowak, L., ... Schleuning, M. (2019). Projected impacts of climate change on functional diversity of frugivorous birds along a tropical elevational gradient. Scientific Reports, 9(1), 17708. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53409-6>.
6. Brown, J. H., Valone, T. J., & Curtin, C. G. (1997). Reorganization of an arid ecosystem in response to recent climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 94(18), 9729–9733. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.18.9729>
7. Cadotte, M. W., Carscadden, K., & Mirochnick, N. (2011, October). Beyond species: Functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. Journal of Applied

- Ecology, Vol. 48, pp. 1079–1087. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02048.x>.
- 8. Callaway, R. M. (1995). Positive interactions among plants. *The Botanical Review*, 61(4), 306–349. <https://doi.org/10.1007/BF02912621>.
 - 9. Callaghan, C. T., Rowley, J. J. L., Cornwell, W. K., Poore, A. G. B., & Major, R. E. (2019). Improving big citizen science data: Moving beyond haphazard sampling. *PLOS Biology*, 17(6), e3000357. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000357>.
 - 10. Casanoves, F., Pila, L., & Di Rienzo, J.A. (2011). Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Turrialba, Costa Rica, 2011. 119pp.
 - 11. Manoli, G., Faticchi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., ... Bou-Zeid, E. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 573(7772), 55–60. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>.
 - 12. McCain, C. M., & Grytnes, J.-A. (2010). Elevational Gradients in Species Richness. In *Encyclopedia of Life Sciences*. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0022548>.
 - 13. Díaz, S., Quétier, F., Cáceres, D. M., Trainor, S. F., Pérez-Harguindeguy, N., Bret-Harte, M. S., Poorter, L. (2011). Linking functional diversity and social actor strategies in a framework for interdisciplinary analysis of nature's benefits to society. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(3), 895–902. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1017993108>
 - 14. Díaz, S., Lavorel, S., Chapin, F. S., Tecco, P. A., Gurvich, D. E., & Grigulis, K. (2007). Functional Diversity — at the Crossroads between Ecosystem Functioning and Environmental Filters. In *Global Change — The IGBP Series* (pp. 81–91). Retrieved from https://www.academia.edu/8725290/Functional_Diversity_at_the_Crossroads_between_Ecosystem_Functioning_and_Environmental_Filters.
 - 15. Díaz, S., & Cabido, M. (2001). Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(11), 646–655. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(01\)02283-2](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(01)02283-2).
 - 16. Dorado-Correa, A. M., Rodríguez-Rocha, M., & Brumm, H. (2016). Anthropogenic noise, but not artificial light levels predicts song behaviour in an equatorial bird. *Royal Society Open Science*, 3(7). <https://doi.org/10.1098/rsos.160231>.
 - 17. Dunne Jennifer, A., Jackson Stacy, C., & John, H. (2013). Greenhouse Effect. *Encyclopedia of Biodiversity*, 4(2), 16.
 - 18. Durán, S. M., Martin, R. E., Díaz, S., Maitner, B. S., Malhi, Y., Salinas, N., ... Enquist, B. J. (2019). Informing trait-based ecology by assessing remotely sensed functional diversity across a broad tropical temperature gradient. *Science Advances*, 5(12), eaaw8114. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw8114>.
 - 19. Emilsson, T., & Ode Sang, Å. (2017). Impacts of Climate Change on Urban Areas and Nature-Based Solutions for Adaptation. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_2.
 - 20. Escobedo, F. J., Clerici, N., Staudhammer, C. L., & Corzo, G. T. (2015). Socio-ecological dynamics and inequality in Bogotá, Colombia's public urban forests and their ecosystem services. *Urban Forestry and Urban Greening*, 14(4), 1040–1053. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.09.011>.
 - 21. Evans, N., Baierl, A., Semenov, M. A., Gladders, P., & Fitt, B. D. L. (2008). Range and severity of a plant disease increased by global warming. *Journal of The Royal Society Interface*, 5(22), 525–531. <https://doi.org/10.1098/rsif.2007.1136>.
 - 22. Finegan, B., Peña-Claros, M., de Oliveira, A., Ascarrunz, N., Bret-Harte, M. S., Carreño-Rocabado, G., Poorter, L. (2015). Does functional trait diversity predict above-ground biomass and productivity of tropical forests? Testing three alternative hypotheses. *Journal of Ecology*, 103(1), 191–201. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12346>.
 - 23. Grote, R., Samson, R., Alonso, R., Amorim, J. H., Cariñanos, P., Churkina, G., ... Calfapietra, C. (2016). Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(10), 543–550. <https://doi.org/10.1002/fee.1426>.
 - 24. IPCC. (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
 - 25. JBB (2019). Sistema Integral de Gestión del Arbolado Urbano de Bogotá (SiGAU). Jardín Botánico de Bogotá. <http://www.jbb.gov.co/index.php/sigau>.

26. Jordano, P. (1987). Patterns of mutualistic interactions in pollination and seed dispersal: connectance, dependence asymmetries, and coevolution. *American Naturalist*, 129(5), 657–677. <https://doi.org/10.1086/284665>.
27. Londoño, M. C., Saboyá, L. P., & Urbina-Cardona, N. (2019). Conocimiento científico de los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad continental: productividad de las instituciones colombianas y propuesta para un análisis integral. *Biodiversidad En Práctica*, 4.
28. Kattge, J., Díaz, S., Lavorel, S., Prentice, I. C., Leadley, P., Bönisch, G., ... Soudzilovskaia, N. C. (2011). TRY - a global database of plant traits. *Global Change Biology*, 17(9), 2905–2935. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02451.x>.
29. Martín-López, B., González, J. A., Díaz, S., Castro, I., & García-Llorente, M. (2007). Biodiversidad y bienestar humano: el papel de la diversidad funcional. *Ecosistemas*, 16(3), 68–79. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54016308>.
30. McBride, J. R., & Laćan, I. (2018). The impact of climate-change induced temperature increases on the suitability of street tree species in California (USA) cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.07.020>.
31. Nitschke, C. R., Nichols, S., Allen, K., Dobbs, C., Livesley, S. J., Baker, P. J., & Lynch, Y. (2017). The influence of climate and drought on urban tree growth in southeast Australia and the implications for future growth under climate change. *Landscape and Urban Planning*, 167, 275–287. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2017.06.012>.
32. Parmesan, C., Burrows, M. T., Duarte, C. M., Poloczanska, E. S., Richardson, A. J., Schoeman, D. S., & Singer, M. C. (2013). Beyond climate change attribution in conservation and ecological research. *Ecology Letters*, 16, 58–71. <https://doi.org/10.1111/ele.12098>.
33. Parmesan, C. (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37(1), 637–669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>.
34. Project, U. M. (2005). Investing in development: a practical plan to achieve the Millennium Development Goals. United Nations, New York.
35. Por, L., Ángel, González, A., Domínguez Calle, E., De, F., Ambientales, E., ... Ángel, B. (2010). Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. *Revista de La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A, Matemáticas*, 34, 173–183.
36. Sachs, J. D. (2012). From millennium development goals to sustainable development goals. *The Lancet*, Vol. 379, pp. 2206–2211. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)60685-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60685-0).
37. Schleuning, M., Fründ, J., Schweiger, O., Welk, E., Albrecht, J., Albrecht, M., ... Hof, C. (2016). Ecological networks are more sensitive to plant than to animal extinction under climate change. *Nature Communications*, 7. <https://doi.org/10.1038/ncomms13965>.
38. Stevens, G. C. (1992). The Elevational Gradient in Altitudinal Range: An Extension of Rapoport's Latitudinal Rule to Altitude. *The American Naturalist*, 140(6), 893–911. <https://doi.org/10.1086/285447>.
39. Stiles, F. G., Rosselli, L., & De La Zerda, S. (2017). Changes over 26 Years in the Avifauna of the Bogotá Region, Colombia: Has Climate Change Become Important? *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 58. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00058>.
40. Susca, T., Gaffin, S. R., & Dell'Osso, G. R. (2011). Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2119–2126. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2011.03.007>.
41. Violette, C., Reich, P. B., Pacala, S. W., Enquist, B. J., & Kattge, J. (2014). The emergence and promise of functional biogeography. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(38), 13690–13696. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415442111>.
42. Thébaud, E., & Fontaine, C. (2010). Stability of ecological communities and the architecture of mutualistic and trophic networks. *Science*, 329(5993), 853–856. <https://doi.org/10.1126/science.1188321>.
43. Tubby, K. V., & Webber, J. F. (2010). Pests and diseases threatening urban trees under a changing climate. *Forestry*, 83(4), 451–459. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq027>.
44. Watson, K., & Stallins, J. A. (2016). Honey Bees and Colony Collapse Disorder: A Pluralistic Reframing. *Geography Compass*, 10(5), 222–236. <https://doi.org/10.1111/gec3.12266>.
45. Yang, J. (2009). Assessing the Impact of Climate Change on Urban Tree Species Selection: A

- Case Study in Philadelphia. *Journal of Forestry*, 107(7), 364–372.
<https://doi.org/10.1093/jof/107.7.364>.
46. Yow, D. M. (2007). Urban Heat Islands: Observations, Impacts, and Adaptation. *Geography Compass*, 1(6), 1227–1251. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2007.00063>.
47. Zohdy, S., Schwartz, T. S., & Oaks, J. R. (2019). The Coevolution Effect as a Driver of Spillover. *Trends in Parasitology*. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2019.03.010>.