

Trabajo Final - Curso: Enfoques, métodos y herramientas para el análisis de la conectividad ecológica

Análisis de conectividad ecológica aplicado a *Melipona beecheii*

César Hernández Hernández



Introducción

Melipona beecheii, conocida por ser una especie nativa de la península de Yucatán y otras zonas de Centroamérica, se caracteriza por no tener aguijón a diferencia de *Apis mellifera*, abeja de origen asiático-europeo, y cuyo uso en apicultura se ha extendido a todos los continentes.

La miel de *Melipona beecheii* ha tenido un amplio uso para consumo y en medicina (Cauich et al, 2015), sin embargo, su producción se limita a sólo litro y medio de miel al año por colmena, a diferencia de los cerca de 30 litros producidos por *Apis mellifera*, por lo que su decreciente distribución se vuelve un tema de importancia para su conservación (Villanueva-Gutiérrez et al 2005). Dada su relevancia como polinizadora y su estrecha relación con los ecosistemas tropicales, resulta prioritario evaluar el grado de conectividad de los paisajes donde se distribuye esta especie.

En este contexto, la conectividad ecológica es un componente fundamental para la conservación de la biodiversidad, ya que determina la capacidad de las especies para desplazarse, intercambiar material genético y acceder a los recursos necesarios para su supervivencia.

La herramienta Makurhini, desarrollada en el entorno de R, ofrece un conjunto de funciones especializadas para medir y analizar distintos índices de conectividad ecológica a escalas espaciales variadas. Su aplicación en estudios enfocados en *M. beecheii* posibilita identificar áreas estratégicas para la conservación y el manejo, así como generar insumos científicos que fortalezcan la planificación territorial orientada a mantener la funcionalidad de la red ecológica.

Con el uso de esta herramienta, se plantea responder a las siguientes preguntas.

- ¿Qué parches de hábitat funcionan como nodos clave para mantener la conectividad ecológica de *Melipona beecheii* en el paisaje de estudio?
- ¿Cómo influye la fragmentación del paisaje en la distribución espacial y en la conectividad de los parches potencialmente utilizados por *Melipona beecheii*?
- ¿Qué regiones presentan mayor potencial de restauración para incrementar la conectividad ecológica de *M. beecheii*?

Metodología

Área de estudio

El análisis se realizó en la Península de Yucatán (estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo), delimitando la zona de interés mediante polígonos obtenidos del repositorio GADM, e integrando las capas de uso de suelo y vegetación a escala 1:250,000 (INEGI), filtrando las categorías que representan hábitats adecuados para *Melipona beecheii*. Estos hábitats se determinaron con base en la literatura, e incluyen estudios de plantas que se han reportado como fuente de alimento para esta especie (Hernández, 2014; Pérez, et al, 2025; León et al, 2023).

Se incluyeron selvas altas, medianas y bajas en sus distintas variantes (perennifolia, subperennifolia, subcaducifolia y caducifolia), vegetación secundaria arbórea asociada, así como ecosistemas complementarios relevantes como manglares y sabanas. Tras esta selección, se generó una base de 3,763 parches de hábitat que constituyeron la unidad de análisis.

Las capas fueron transformadas al sistema de referencia UTM zona 16N. Se validaron y corrigieron geometrías inválidas y se realizó la intersección espacial de las coberturas de vegetación con la máscara de los estados seleccionados, delimitando así el área de estudio con un total de 13.87 millones de hectáreas. Con las capas listas, se realizaron los siguientes análisis de conectividad ecológica.

Análisis de fragmentación del paisaje

A nivel de parche se calcularon métricas como área, perímetro, porcentaje de borde, área núcleo (CAPercent), relación perímetro-área (PARA), índice de forma (Shape Index) y dimensión fractal (FRAC).

A nivel de paisaje, se estimaron métricas de conectividad estructural, incluyendo el **MESH** (Mean Effective Mesh Size), considerando diferentes profundidades de efecto de borde (100, 500 y 1000 m). También se realizó un análisis espacializado de MESH mediante la generación de una grilla de 40 km², lo que permitió identificar áreas con mayor o menor fragmentación relativa.

Análisis de centralidad

Para evaluar la importancia relativa de los parches dentro de la red de conectividad, se calcularon métricas de centralidad mediante el algoritmo MK_RMCentralty(): Strength (peso de las conexiones de cada nodo); Betweenness centrality (BWC), indicador de intermediación en las rutas más cortas; Agrupamientos de nodos mediante Random Walks y el algoritmo de Louvain.

El cálculo se realizó bajo una probabilidad de dispersión y umbrales de distancia que reflejan la capacidad de movimiento de *M. beecheii*, es decir, un umbral de distancia de 1km y una probabilidad de dispersión de 0.5. El cálculo se realizó tomando en cuenta la distancia euclidiana entre bordes, debido a que estima mejor las distancias entre parches con formas irregulares.

Índice integral de conectividad y Probabilidad de conectividad

Se estimaron métricas de conectividad integrales y focales: **Índice Integral de Conectividad (IIC) y sus fracciones (dIICintra, dIICflux, dIICconnector, dIICcrest); Probabilidad de Conectividad (PC)** y métricas derivadas y finalmente el Índice Compuesto de Conectividad (CCI).

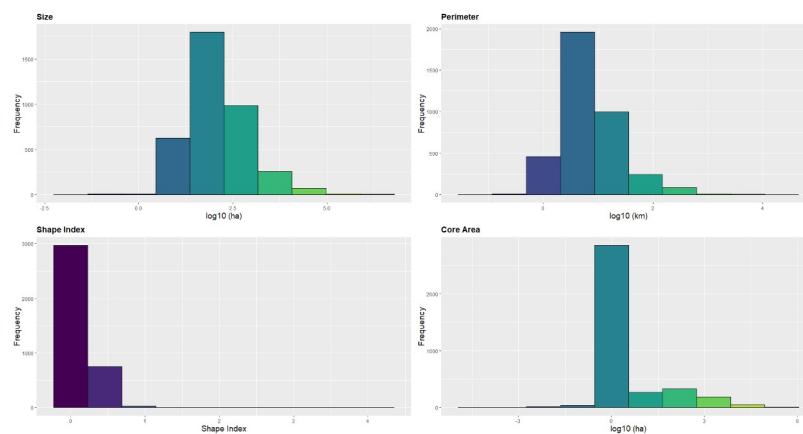
Para estos parámetros se consideró una distancia euclidiana desde el borde de los parches y un umbral de distancia de 1km, así como una probabilidad de dispersión de 0.5. Esta distancia se estableció como un punto medio de la distancia reportada en la literatura, donde se ha reportado que *M. beecheii* es capaz de viajar distancias de entre **0.5 hasta 1.5 km** (Vossler, 2019; Biesmeijer, 1998).

Prioridades de Restauración con MK_dPCIIC()

Se evaluó la conectividad de la red de parches de hábitat potencial para *Melipona beecheii* mediante la simulación de restauración de parches y el cálculo del índice dPC en paisajes focales. Para esto se seleccionaron aleatoriamente 150 parches para simular su restauración dentro del paisaje y se aplicó la función MK_dPCIIC() del paquete Makurhini para calcular la importancia de los parches dentro de una red de conectividad ecológica, basándose en los índices dPC (probabilidad de conectividad) y dIIC (índice integral de conectividad).

Resultados

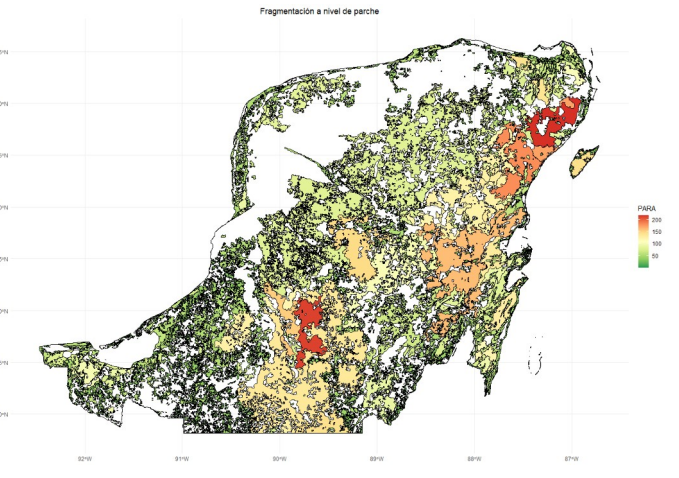
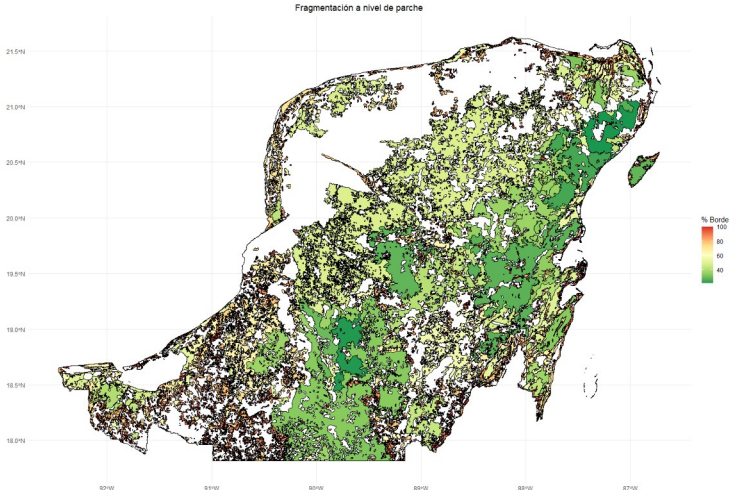
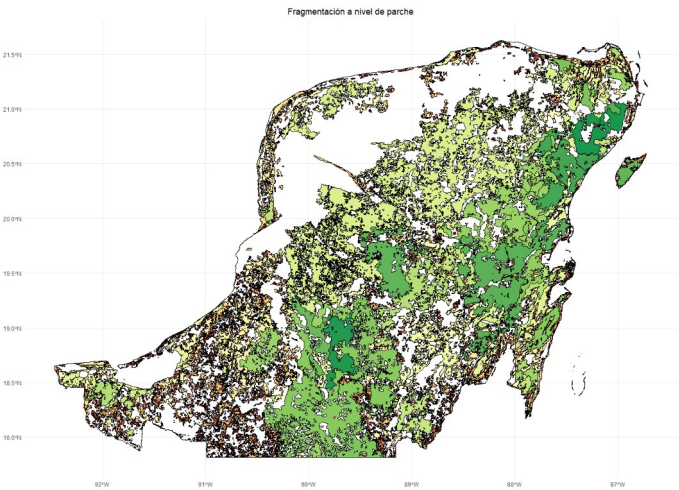
En el análisis descriptivo aplicado a los parches de hábitat potencial para *Melipona beecheii* se obtuvieron gráficos exploratorios de distribución del área de los parches, de relación área-perímetro, índice de forva vs. Área y área núcleo vs. Área total, que permiten caracterizar su estructura espacial.

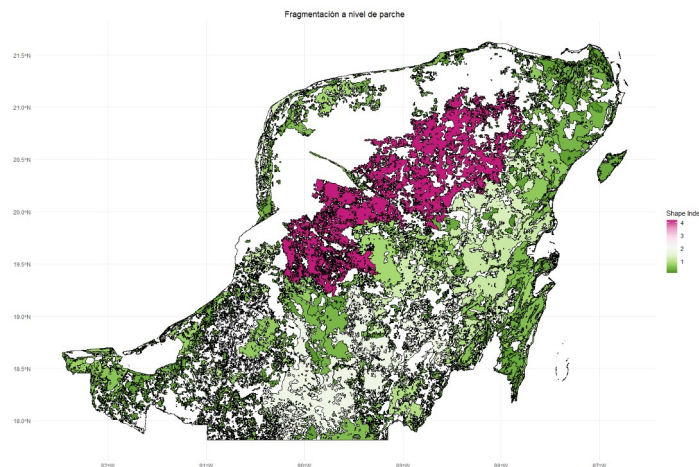
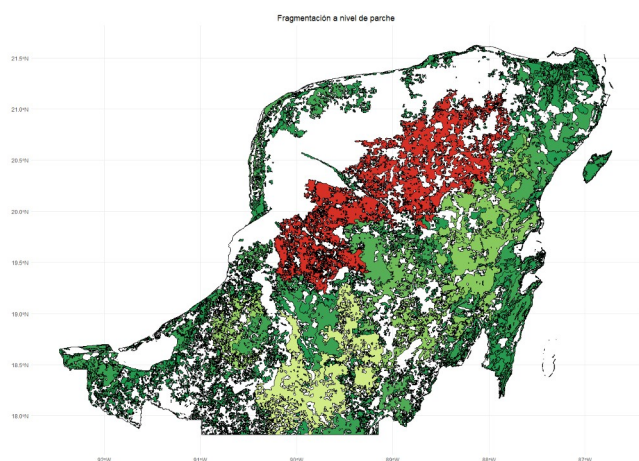


Análisis de fragmentación del paisaje

Asimismo, se calcularon índices de fragmentación que incluyen estadísticos a nivel de parche y a nivel de paisaje, incluyendo, en este apartado se obtuvieron gráficos de % de área núcleo, % de borde, perímetro, proporción de área núcleo, índice de forma e índice de dimensión fractal.

```
> Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`
Simple feature collection with 3763 features and 12 fields
Geometry type: MULTIPOLYGON
Dimension: XY
Bounding box: xmin: -77286.93 ymin: 1971097 xmax: 528950.9 ymax: 2391347
Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 16N
First 10 features:
  DESCRIPCIO  COV_  COV_ID  codigo  Area  CA  CAPercent  Perimeter  EdgePercent  PARA  ShapeIndex  FRAC  geometry
1 SELVA ALTA PERENNIFOLIA 92805 92806 20401010400 23.5366 0.0000 0.0000 2.104 100.0000 11.1866 0.1223 0.4710 MULTIPOLYGON (((-32292.81 2...
2 SELVA ALTA PERENNIFOLIA 92806 92807 20401010400 29.9953 0.0000 0.0000 2.539 100.0000 11.8138 0.1308 0.5479 MULTIPOLYGON (((-31641.25 2...
3 SELVA ALTA PERENNIFOLIA 92807 92808 20401010400 145.4954 0.0000 0.0000 7.389 100.0000 19.6908 0.1728 0.8032 MULTIPOLYGON (((-31584.19 2...
4 SELVA ALTA PERENNIFOLIA 92809 92810 20401010400 99.4905 0.0000 0.0000 4.820 100.0000 20.6412 0.1363 0.6838 MULTIPOLYGON (((-34787.25 2...
5 SELVA ALTA PERENNIFOLIA 92810 92811 20401010400 95.3315 0.0000 0.0000 5.252 100.0000 18.1515 0.1517 0.7279 MULTIPOLYGON (((-30750.58 2...
6 SELVA ALTA PERENNIFOLIA 92812 92813 20401010400 336.2049 33.0151 9.8199 10.443 90.1801 32.1943 0.1607 0.8065 MULTIPOLYGON (((-32100.98 2...
7 SELVA ALTA PERENNIFOLIA 92817 92818 20401010400 135.3226 0.0000 0.0000 8.338 100.0000 16.2296 0.2022 0.8643 MULTIPOLYGON (((-37664.83 2...
8 SELVA ALTA PERENNIFOLIA 92821 92822 20401010400 54.8062 0.0000 0.0000 6.076 100.0000 9.0201 0.2315 0.9013 MULTIPOLYGON (((-30409.4 20...
9 SELVA ALTA PERENNIFOLIA 92822 92823 20401010400 447.3804 24.8185 5.5475 14.171 94.4525 31.5701 0.1890 0.8688 MULTIPOLYGON (((-32145.97 2...
10 SELVA ALTA PERENNIFOLIA 92823 92824 20401010400 276.7673 3.1246 1.1290 11.417 98.8710 24.2417 0.1936 0.8661 MULTIPOLYGON (((-46378.62 2...
```



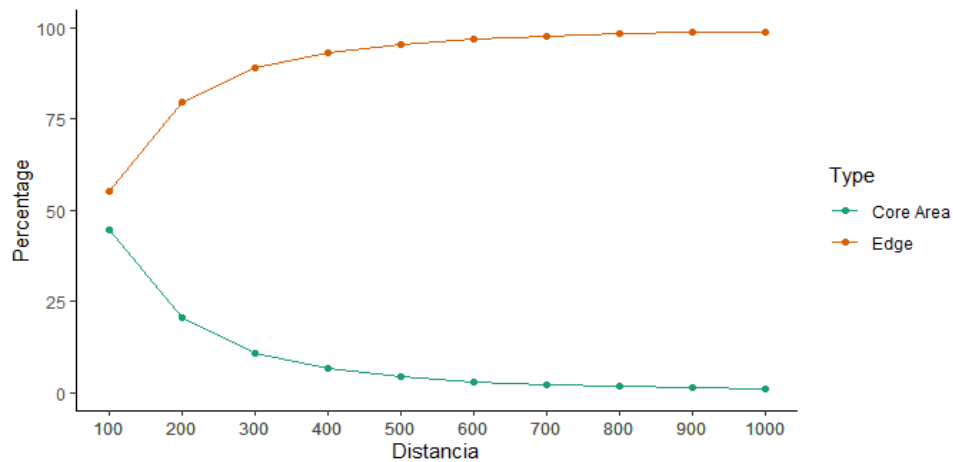


En el análisis se encontró una densidad de malla (MESH) de 249636.4891. Se obtuvo además una estimación del cambio de fragmentación de los parches de acuerdo al cambio en las distancias de profundidad del efecto borde, así como un gráfico que muestra la relación entre el porcentaje del área núcleo y el borde de los parches.

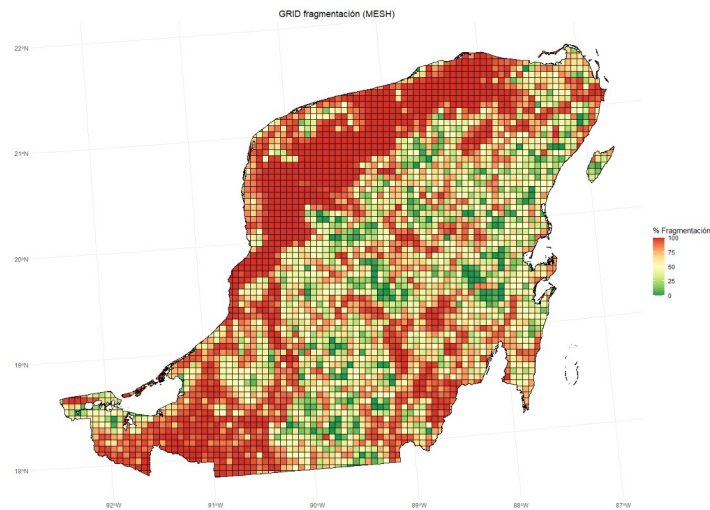
Metric	Value
Patch area (ha)	7827476.2698
Number of patches	3763.0000
Size (mean)	2080.1159
Patches < minimum patch area	1948.0000
Patches < minimum patch area (%)	1.0165
Total edge	112443.3810
Edge density	0.0144
Patch density	0.0271
Total Core Area (ha)	3869811.6738
Cority	0.2735
Shape Index (mean)	0.1983
FRAC (mean)	0.7508
MESH (ha)	249636.4891

> Fragmentacion.2

Edge.distance	Type	Percentage
1 100	Core Area	44.8350208
2 100	Edge	55.1649792
3 200	Core Area	20.4268573
4 200	Edge	79.5731427
5 300	Core Area	10.9463954
6 300	Edge	89.0536046
7 400	Core Area	6.6340252
8 400	Edge	93.3659748
9 500	Core Area	4.3493939
10 500	Edge	95.6506061
11 600	Core Area	3.0219964
12 600	Edge	96.9780036
13 700	Core Area	2.1872122
14 700	Edge	97.8127878
15 800	Core Area	1.6331832
16 800	Edge	98.3668168
17 900	Core Area	1.2532808
18 900	Edge	98.7467192
19 1000	Core Area	0.9826866
20 1000	Edge	99.0173134



Con respecto al índice MESH, el resultado fue un gráfico del hábitat con un grid que incluye el porcentaje de fragmentación por celda, haciendo más fácil localizar las zonas más fragmentadas.



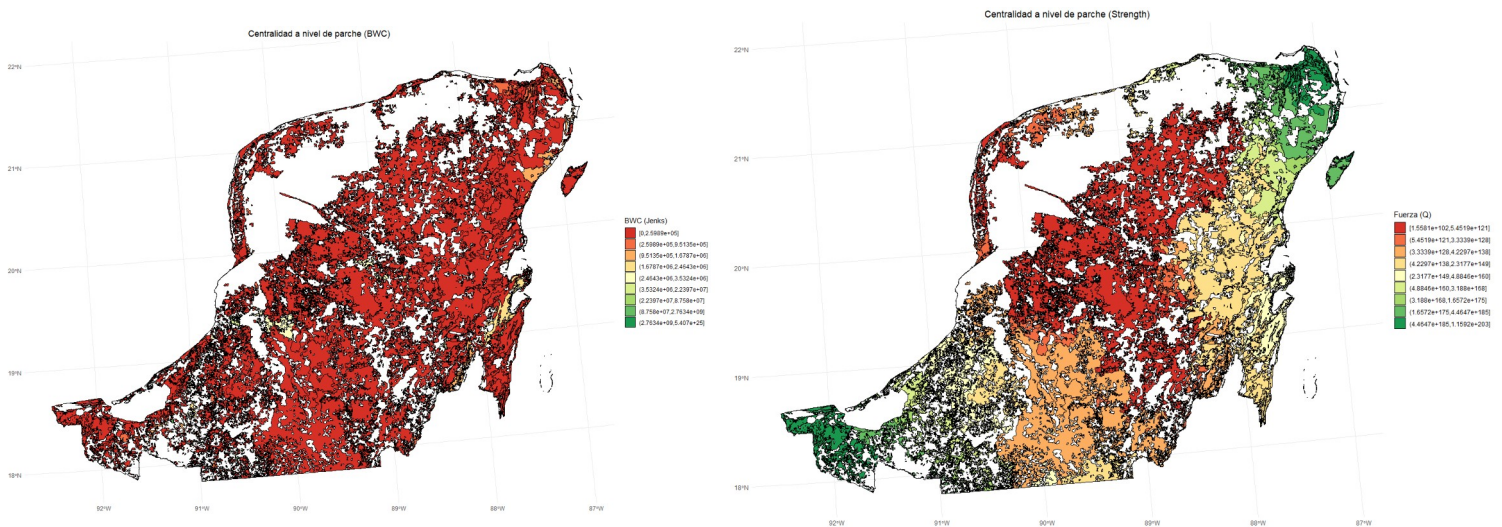
Análisis de centralidad

A nivel de red, se obtuvieron métricas de centralidad, entre las que se encuentran Centralidad a nivel de parche (strength) y Centralidad de Intermediación (BWC), Caminatas Aleatorias Cortas (memb.rw) y Algoritmo de Louvain (memb.louvain); estos índices permiten identificar la importancia relativa de los fragmentos en la conectividad.

Para estos índices se generaron gráficos que ayudan a identificar qué parches son más importantes para mantener la conectividad. sin embargo, hubo un problema con los gráficos de Caminatas Aleatorias Cortas (memb.rw) y Algoritmo de Louvain (memb.louvain), ya que no se pudieron generar los gráficos adecuadamente (el resultado mostraba un gráfico con 712 grupos generados en memb.rw, lo que hacía que la leyenda del mapa abarcara toda la zona del gráfico).

```
> centrality_test
Simple feature collection with 3763 features and 11 fields
Geometry type: MULTIPOLYGON
Dimension: XY
Bounding box: xmin: -77286.93 ymin: 1971097 xmax: 528950.9 ymax: 2391347
Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 16N
First 10 features:
```

	DESCRIPCIO	COV_	COV_ID	codigo	strength	eigen	close	BWC	cluster	memb.rw	memb.louvain	geometry
1	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92805	92806	20401010400	2.414123e+200	4.107814e-03	1.818890e-08	3697.91763	1	46	1	MULTIPOLYGON (((-32292.81 2...
2	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92806	92807	20401010400	1.498718e+200	2.550113e-03	1.818890e-08	28.02132	1	46	2	MULTIPOLYGON (((-31641.25 2...
3	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92807	92808	20401010400	6.518766e+199	1.109131e-03	1.818890e-08	11641.39623	1	46	3	MULTIPOLYGON (((-31584.19 2...
4	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92809	92810	20401010400	4.100919e+200	6.974374e-03	1.818890e-08	22357.64532	1	46	4	MULTIPOLYGON (((-34787.25 2...
5	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92810	92811	20401010400	2.067157e+199	3.516653e-04	1.818890e-08	44304.24756	1	46	5	MULTIPOLYGON (((-30750.58 2...
6	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92812	92813	20401010400	7.948551e+199	1.352030e-03	1.818890e-08	25946.89166	1	46	6	MULTIPOLYGON (((-32100.98 2...
7	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92817	92818	20401010400	7.917607e+200	1.345785e-02	1.818889e-08	7490.08391	1	46	7	MULTIPOLYGON (((-37664.83 2...
8	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92821	92822	20401010400	4.328972e+198	7.361238e-05	1.818890e-08	166756.45413	1	46	8	MULTIPOLYGON (((-30409.4 20...
9	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92822	92823	20401010400	1.524269e+199	2.591705e-04	1.818890e-08	4159.94360	1	46	9	MULTIPOLYGON (((-32145.97 2...
10	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92823	92824	20401010400	1.349297e+202	2.291692e-01	1.818888e-08	2.20321	1	46	10	MULTIPOLYGON (((-46378.62 2...



Índice integral de conectividad y Probabilidad de conectividad

En este apartado, se estimaron los índices integrales de conectividad (IIC y PC) y sus fracciones (dIIC, dIICintra, dIICflux, dIICconnector, dIICcrest), así como los índices focales (IICf, PCf y CCIf), que ofrecen una aproximación detallada sobre la contribución de cada parche a la conectividad ecológica del paisaje.

En el caso del índice integral de conectividad (IIC), el resultado fue un valor de **2.193214e+13** de IIC, 4.683176e+06 de área equivalente conectada (EC(IIC)) y un índice norlalizado de IIC de 0.1139811.

```
> IIC
      Index      value
1  IICnum 2.193214e+13
2  EC(IIC) 4.683176e+06
3    IIC 1.139811e-01
```

Por otra parte, al calcular el índice con el parámetro onlyoverall = FALSE, se obtuvo el resultado de los valores individuales por nodo o parche para conocer la importancia de cada parche en el ecosistema, así como los gráficos de IIC y de cada una de las fracciones para nuestro ecosistema (dIIC Intra, dIIC Flux y dIICconnector).

> IIC

Simple feature collection with 3763 features and 8 fields

Geometry type: MULTIPOLYGON

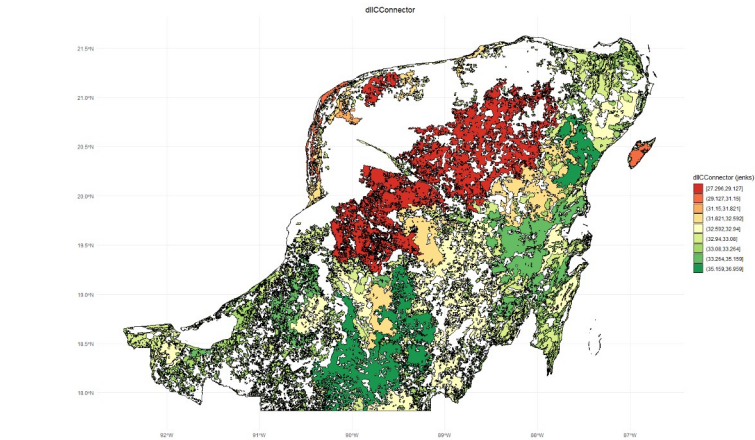
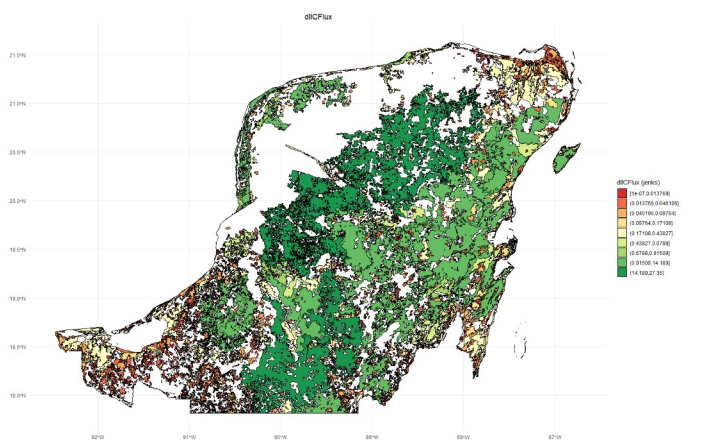
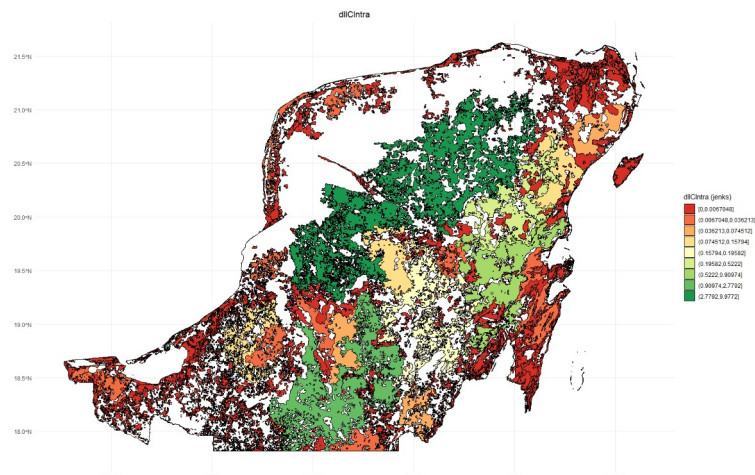
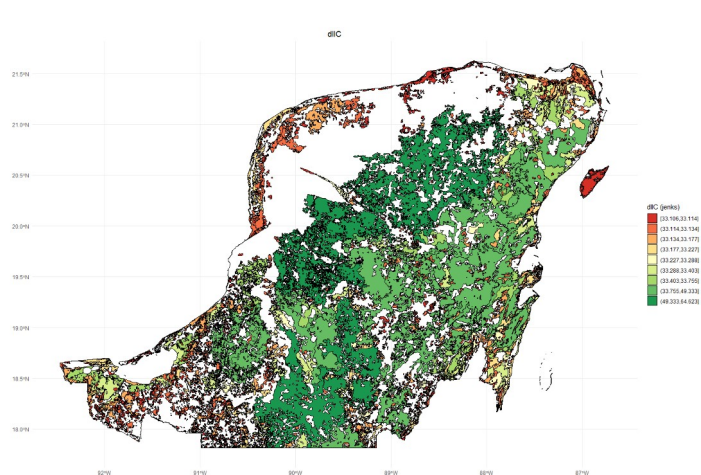
Dimension: XY

Bounding box: xmin: -77286.93 ymin: 1971097 xmax: 528950.9 ymax: 2391347

Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 16N

First 10 features:

	DESCRIPCIO	COV_	COV_ID	codigo	dIIC	dIICintra	dIICflux	dIICconnector	geometry
1	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92805	92806	20401010400	33.10631	0e+00	0.0016523	33.10466	MULTIPOLYGON (((-32292.81 2...
2	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92806	92807	20401010400	33.10631	0e+00	0.0021058	33.10421	MULTIPOLYGON (((-31641.25 2...
3	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92807	92808	20401010400	33.10631	1e-07	0.0102144	33.09610	MULTIPOLYGON (((-31584.19 2...
4	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92809	92810	20401010400	33.10632	0e+00	0.0069848	33.09933	MULTIPOLYGON (((-34787.25 2...
5	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92810	92811	20401010400	33.10665	0e+00	0.0007551	33.10589	MULTIPOLYGON (((-30750.58 2...
6	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92812	92813	20401010400	33.10632	5e-07	0.0236028	33.08271	MULTIPOLYGON (((-32100.98 2...
7	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92817	92818	20401010400	33.10631	1e-07	0.0095002	33.09681	MULTIPOLYGON (((-37664.83 2...
8	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92821	92822	20401010400	33.10651	0e+00	0.0004341	33.10607	MULTIPOLYGON (((-30409.4 20...
9	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92822	92823	20401010400	33.11087	9e-07	0.0037934	33.10708	MULTIPOLYGON (((-32145.97 2...
10	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	92823	92824	20401010400	33.10739	3e-07	0.0023028	33.10509	MULTIPOLYGON (((-46378.62 2...



Para la Probabilidad de conectividad (PC), se obtuvo un Pcnun de 5.551748e+13 y un Área equivalente (EC(PC)) de 7.450334e+06 .

```
> PC
      Index      value
1  PCnum 5.550748e+13
2  EC(PC) 7.450334e+06
```

Sin embargo, no fue posible realizar el cálculo de las fracciones de PC debido a la gran carga de cómputo que conlleva el uso de tantos parches (El tiempo estimado era de 1 día, y al intentarlo mi PC falló a las 3 horas X_X). No obstante, en el anexo se incluye el código que se hubiera utilizado si se hubiera completado esta parte del análisis.

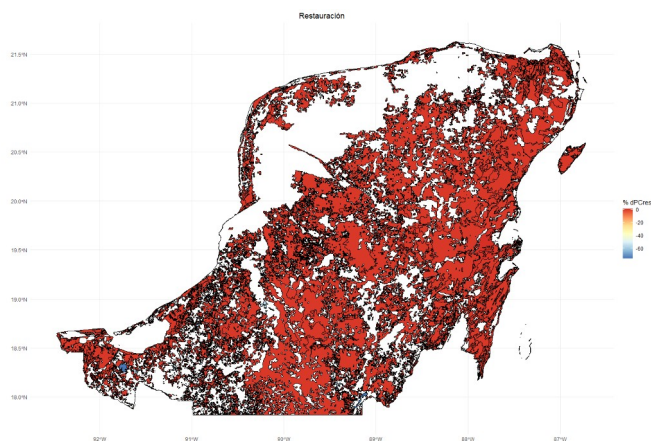
Simulación de Restauración con MK_dPCIIC()

Se obtuvo un muestreo aleatorio de 150 parches que se simularon ser restaurados para evaluar el impacto en la conectividad global. El resultado de la simulación es una tabla con los valores de cambio en el índice de conectividad PC al ser restaurados los parches seleccionados (dPCres).

```
> head(PCrestauracion_restaurados, 10)
Simple feature collection with 10 features and 6 fields
Geometry type: MULTIPOLYGON
Dimension: XY
Bounding box: xmin: 146168.5 ymin: 2123157 xmax: 491396.8 ymax: 2384412
Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 16N
```

	DESCRIPCIO	COV_	COV_ID	codigo restauracion	dPCres	geometry
1	TULAR	178450	178451	21007030400	0 0.94851964	MULTIPOLYGON (((421516 2167...
2	TULAR	178701	178702	21007030400	0 -0.01557157	MULTIPOLYGON (((490204 2373...
3	TULAR	178693	178694	21007030400	0 -0.06212829	MULTIPOLYGON (((357128.3 23...
4	TULAR	178528	178529	21007030400	0 -0.09981801	MULTIPOLYGON (((423969.8 22...
5	TULAR	178499	178500	21007030400	0 -0.10095089	MULTIPOLYGON (((442569.2 22...
6	TULAR	178523	178524	21007030400	0 -0.11495640	MULTIPOLYGON (((146506.2 22...
7	TULAR	178530	178531	21007030400	0 -0.12053319	MULTIPOLYGON (((154379.9 23...
8	TULAR	178567	178568	21007030400	0 -0.12122265	MULTIPOLYGON (((185084.6 23...
9	TULAR	178631	178632	21007030400	0 -0.15821268	MULTIPOLYGON (((478029.7 23...
10	TULAR	178625	178626	21007030400	0 -0.17915348	MULTIPOLYGON (((324042 2371...

Otro resultado de esta función son los gráficos de dPCres luego de la restauración, tanto del paisaje global, como destacando sólo los parches seleccionados.



Discusión

El paisaje estudiado cuenta con una cobertura total considerable (7827476 ha), pero distribuida en un número elevado de fragmentos (3763 parches). Esto confirma un patrón fragmentado, donde el hábitat no está concentrado en bloques grandes sino dividido en muchas unidades.

Aunque el promedio de área parece relativamente grande (2,080 ha), la distribución real (según los histogramas descriptivos) está sesgada: ya que la tendencia de los parches favorece a parches de tamaño pequeño o mediano, mientras que existen pocos parches de tamaños grandes, algo común en paisajes con cierto grado de fragmentación, donde existen fragmentos residuales. Esto se refuerza con el patrón de su perímetro, existiendo una considerable cantidad de parches con perímetros pequeños.

Por otro lado, solo un ~1% de los parches está por debajo del umbral de tamaño mínimo considerado. Esto sugiere que la mayoría sí supera un tamaño crítico, pero eso no significa que sean funcionales para *Melipona beecheii*, ya que la calidad del hábitat y la presencia de núcleo son determinantes.

Otro aspecto crítico es el reducido valor del área núcleo, lo que conlleva a que los parches se vean afectados por el efecto borde, esto refleja que los fragmentos están muy expuestos a perturbaciones externas (cambios de temperatura, viento, actividades humanas). Para *M. beecheii*, que depende de microclimas estables, el efecto borde puede afectar la disponibilidad de nidos y recursos. Esto se refuerza con el calor de área núcleo total (~5% del área total).

Basándonos en los gráficos, puede observarse que la mayor proporción de área núcleo (colores verdes más intensos, >60%) se concentra en el centro y noreste de la península. Esta distribución indica que las colonias tienen más probabilidad de persistir en el noreste y centro, donde existen parches con mayor proporción de núcleo.

Por otro lado, el gráfico de relación entre el porcentaje del área núcleo y el borde de los parches nos muestra que a mayores profundidades de efecto borde, la proporción de hábitat realmente útil (núcleo) disminuye mucho (44.8% con una distancia de borde de 100m).

Sin embargo, la gran mayoría de parches parecen tener un índice de forma muy pequeño, lo que indica formas compactas y regulares. Esto parece indicar parches poco fragmentados internamente, sino relativamente compactos (debido quizá al gran tamaño de paisaje seleccionado).

Dado que *M. beecheii* tiene distancias de vuelo limitadas (alrededor de 500 m hasta 1.5 km en promedio), la predominancia de parches pequeños y sin núcleo dificulta que las colonias encuentren fuentes de alimento estables y sitios adecuados de nidificación dentro de un mismo fragmento. Además, la falta de grandes áreas núcleo significa que los fragmentos ofrecen menos refugios con condiciones microclimáticas óptimas para la cría.

Respecto al índice MESH, el gráfico nos muestra un gran grado de fragmentación en la parte noroeste de la península, lo que representa zonas poco adecuadas para la dispersión de *M. beecheii*.

Con el análisis de los índices de centralidad podemos observar que los parches en la zona centro de la península (color rojo en el gráfico a nivel de parche- Strength) están fuertemente conectados de manera local, lo que significa que las colonias de *M. beecheii* que habitan ahí tienen mayor facilidad para

moverse o intercambiar polen y recursos entre parches cercanos, por lo que esta zona es crítica para mantener la población local estable.

En el mapa de centralidad de intermediación (BWC) se observa que la gran mayoría de los parches tienen una alta contribución a la conectividad regional, funcionando como puentes ecológicos entre regiones o comunidades de parches, funcionando como stepping stones o cuellos de botella.

Los mapas de Membresía por random walk y Membresía por Louvain no pudieron ser generados. Probablemente debido a la gran cantidad de parches con los que se realizó el estudio. Quizá se pueda solucionar esto reduciendo la cantidad de parches o limitando el área de estudio a una escala más local.

El área equivalente conectada (EC IIC) posee un valor muy alto (4.683176×10^6), lo que puede indicar que la red, a pesar del grado de fragmentación, se encuentra en un buen nivel de conectividad, lo que se traduce en caminos efectivos para la dispersión y colonización de la abeja.

Sin embargo, el IIC normalizado de 0.1139811 (~11% de la conectividad máxima) nos muestra que, aunque hay parches que actúan como puentes, gran parte de la red aún es limitada para dispersión de *M. beecheii*. Esto indica que, si se pierden algunos parches, la conectividad podría disminuir drásticamente, afectando colonias y flujo genético.

Basándose las fracciones de IIC podemos notar que algunos parches tienen una alta importancia en la red de conectividad de la zona.

Con excepción de los parches de la parte media superior, los parches de mayor tamaño parecen tener una mayor importancia de conectividad debido a que aportan la mayor cantidad de hábitat. Además, su posición relativamente central conlleva a que aporten de forma significativamente a la conectividad del paisaje.

Por otra parte, el área equivalente (EC(PC)) (7.450334×10^6) representa el número equivalente de parches totalmente conectados que darían la misma conectividad probabilística que la red actual. Al ser de un valor mayor al EC(IIC), se puede inferir que, cuando consideramos la probabilidad de dispersión (distancia, capacidad de vuelo), la red funcional es más conectada que lo que sugiere solo la conectividad estructural (IIC). Para *M. beecheii*, esto refleja que aunque algunos parches estén aislados, la abeja puede alcanzar varios parches vecinos si tiene capacidad de vuelo suficiente.

Finalmente, en la simulación de restauración de los parches, el resultado muestra el porcentaje de contribución a la conectividad del hábitat si cada parche fuese restaurado. En el gráfico resultante los colores que tienden al rojo representan los parches con mayor aporte a la conectividad del hábitat al ser restaurados., mientras que aquellos de color azul contribuyen de manera muy reducida o negativa.

Con base en el resultado es posible observar que la mayoría de parches de esta simulación disminuirían la conectividad global al restaurarse, algunas explicaciones para este fenómeno pueden ser: a) los nuevos parches restaurados interrumpen conexiones que ya existían en puntos estratégicos, b) la zona donde se restauran estos parches ya está bien conectada entre sí y restaurar estos parches sólo hará que los flujos de especies se compliquen innecesariamente.

Por otro lado, sólo 1 parche ha resultado ser el único con un valor positivo de dPCres (0.948), lo que indica que, en caso de restaurarse, la conectividad de la zona aumentará, aunque tal vez no de manera significativa. También es importante recordar que el valor de dPCres es probabilístico, por lo que debe estudiarse cada caso para tomar una decisión. De igual forma sería interesante realizar estos modelos con otros conjuntos de parches hasta identificar un conjunto de parches que mejoren la conectividad global para *M. beecheii*.

Conclusión

El paisaje estudiado presenta un patrón fragmentado: aunque la cobertura total es considerable (7,827,476 ha), se distribuye en numerosos parches pequeños y medianos, con un reducido valor de área núcleo, lo que limita la funcionalidad del hábitat para *Melipona beecheii* afectando la disponibilidad de refugios estables y sitios de nidificación con microclimas adecuados y aumenta su exposición a efectos de borde. Las zonas del centro y noreste de la península concentran la mayor proporción de núcleo, favoreciendo la persistencia de colonias.

Los índices de centralidad revelan que los parches del centro de la península son críticos para la conectividad local (Strength), facilitando el intercambio de recursos y polen entre parches cercanos. Al mismo tiempo, la mayoría de los parches contribuyen de manera importante a la conectividad regional (BWC), funcionando como puentes que permiten el flujo de colonias entre distintas áreas. Esto indica que la red de parches, aunque fragmentada, mantiene múltiples rutas de dispersión, aunque la conectividad global medida por el IIC normalizado es limitada (~11%), lo que hace vulnerable a la especie ante la pérdida de parches estratégicos.

La comparación entre conectividad estructural (IIC) y probabilística (PC) muestra que la red funcional es mayor cuando se considera la capacidad de vuelo de la abeja, lo que permite que *M. beecheii* alcance varios parches vecinos a pesar de la fragmentación.

La simulación de restauración indican que sólo algunos parches aportan significativamente a la conectividad, subrayando la necesidad de restauración y conservación estratégicas, priorizando corredores y parches clave para mantener la dispersión, el flujo genético y la estabilidad de las colonias.

En conjunto, los resultados sugieren que, para la conservación de *M. beecheii*, es prioritario:

- Proteger los parches con alta conectividad local y regional, especialmente los situados en el centro y noreste de la península.
- Mantener y restaurar estratégicamente aquellos parches que actúan como corredores o stepping stones para asegurar la dispersión y el flujo genético.
- Considerar la restauración y planificación del paisaje basada en simulaciones de conectividad, priorizando parches que realmente aporten al fortalecimiento de la red y evitando intervenciones que puedan fragmentar aún más la red funcional.

Bibliografía

Biesmeijer, J. C.; Tóth, E. (1998). Individual foraging, activity level and longevity in the stingless bee *Melipona beecheii* in Costa Rica (Hymenoptera, Apidae, Meliponinae). *Insectes Sociaux*, 45 (4), 427–443.

Cauich Kumul, Roger, Ruiz Ruiz, Jorge Carlos, Ortiz Vázquez, Elizabeth, & Segura Campos, Maira Rubi. (2015). Potencial antioxidante de la miel de *Melipona beecheii* y su relación con la salud: una revisión. *Nutrición Hospitalaria*, 32(4), 1432-1442.

Hernández Martínez, Fernando Ramón, Paneque Torres, Iván, Toledo Peña, Luisa Elena, Gutiérrez Hernández, Hilda, Ravelo Pimentel, Katuska. (2014). Relación de la población natural de abejas de la tierra (*Melipona beecheii*) con la flora en el valle San Andrés. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* Vol. 2 (1).

León-Canul, R. A.; Chalé-Dzul, J. B.; Vargas-Díaz, A. A.; Ortiz-Díaz, J. J.; Durán-Escalante, K. C.; Carrillo-Ávila, E.; Santillán-Fernández, A. (2023). Identification of Floral Resources Used by the Stingless Bee *Melipona beecheii* for Honey Production in Different Regions of the State of Campeche, Mexico. *Biodiversity*, 15(12), 1218.

Pérez-Morfi A. (2025). Comparative analysis of *Melipona beecheii* pollen foraging preferences in deciduous, semi-deciduous, and semi-evergreen tropical forests of the Yucatan Peninsula. *Apidologie*

Villanueva-Gutiérrez, Rogel, Roubik, David Ward, and Colli Ucan, Wilberto. 2005. "Extinction of *Melipona beecheii* and Traditional Beekeeping in the Yucatán Peninsula." *Bee World*, (2) 35–41.

Vossler Favio G. (2019). Pollen diet assessment and flower association in *Melipona orbignyi* and recommendations on management and conservation of stingless bees in the Chaco dry forest of South America. *Apidologie*, 50, 391–413.

