

Enfoques, métodos y herramientas para el análisis de la conectividad ecológica

Grupo 1

Trabajo final - Transformación de la conectividad en la cuenca del Catatumbo desde el auge del conflicto armado interno (1985) hasta la actualidad (2023)

Violeta Mirabai Cabrera Álvarez

Introducción

La estructura del paisaje, comprendida como la continuidad espacial de ecosistemas y hábitats, permite estudiar la composición general de los elementos ecológicos y antrópicos en un territorio determinado (López et al., 2024). La conectividad del paisaje, capacidad de las especies de moverse en un paisaje, es clave para la conservación de la biodiversidad (Hilty et al., 2020; Taylor et al., 1993). Sin embargo, se ve afectada por procesos sociopolíticos como los conflictos armados que transforman la estructura y funcionalidad de los ecosistemas (Murillo-Sandoval et al., 2022). Colombia, con su historia de conflicto armado e inestabilidad sociopolítica, ofrece un escenario propicio para estudiar los efectos del conflicto sobre el paisaje (Sánchez-Cuervo y Aide, 2013).

El Catatumbo, ecorregión ubicada entre Colombia y Venezuela, es un territorio altamente biodiverso y crucial para la conservación (Forero-Medina y Joppa, 2010; Le Saout et al., 2013, en Negret et al., 2019). La presencia de grupos armados al margen de la ley ha tenido un impacto negativo, acelerando la degradación de ecosistemas clave en la región (Aponte et al., 2022). La complejidad topográfica, la amplia diversidad climática, y su condición binacional representan desafíos para el manejo y la conservación efectiva del territorio (Aponte et al., 2022; Galvis et al., 1997 en Ortega Lara et al., 2012; Rodríguez et al., 1996 en Ortega Lara et al., 2012).

Aunque se han documentado los efectos del conflicto armado y el incremento de la deforestación sobre el uso del suelo en Colombia, la dimensión de la conectividad ecológica ha sido poco explorada, especialmente en contextos transfronterizos como el Catatumbo (Murillo-Sandoval et al., 2022; Sánchez-Cuervo y Aide, 2013; UNODC, 2022). Es importante estudiar la conectividad para formular planes efectivos de conservación en zonas de alta biodiversidad como es el Catatumbo, utilizando el análisis espacialmente explícito que también es carente en esta región. Es por esto que la pregunta de investigación que guía este trabajo es ¿cómo se ha transformado la conectividad del paisaje de la ecorregión del Catatumbo en el periodo de 1985 a 2023?

Metodología

La ecorregión del Catatumbo abarca territorios en el noreste de Colombia y el noroeste de Venezuela (IGAC, 2003 en Ortega-Lara et al., 2012). Pertenece al zonobioma húmedo tropical y su variedad de ecosistemas permite albergar una importante diversidad biológica, reforzando la importancia ecológica del territorio (Rodríguez et al., 2006). Se encuentran áreas de importante valor ecológico y social como el Parque Nacional Natural

Catatumbo-Barí, así como dos resguardos indígenas de la comunidad barí (Aponte et al., 2022; Procuraduría General de la Nación, 2020 en Aponte et al., 2022).

Figura 1

Área de estudio. Parches de bosque en la cuenca colombiana del Catatumbo para 1985.

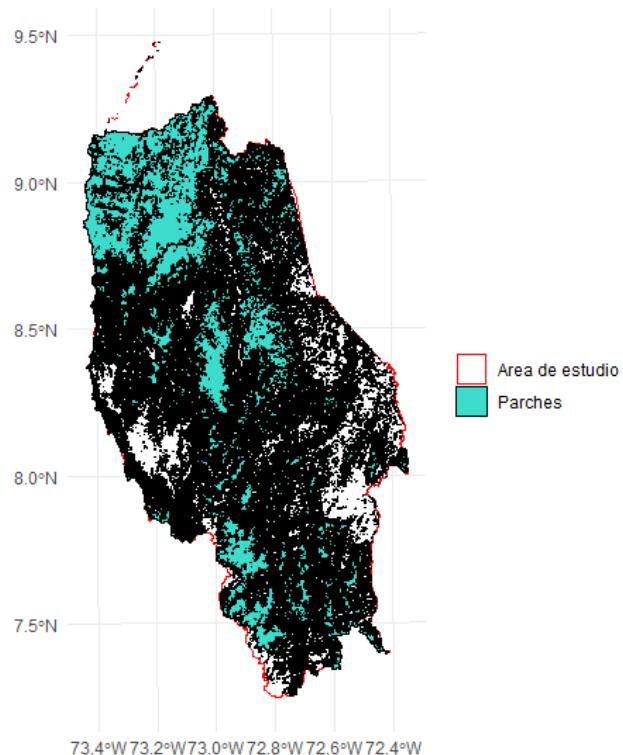
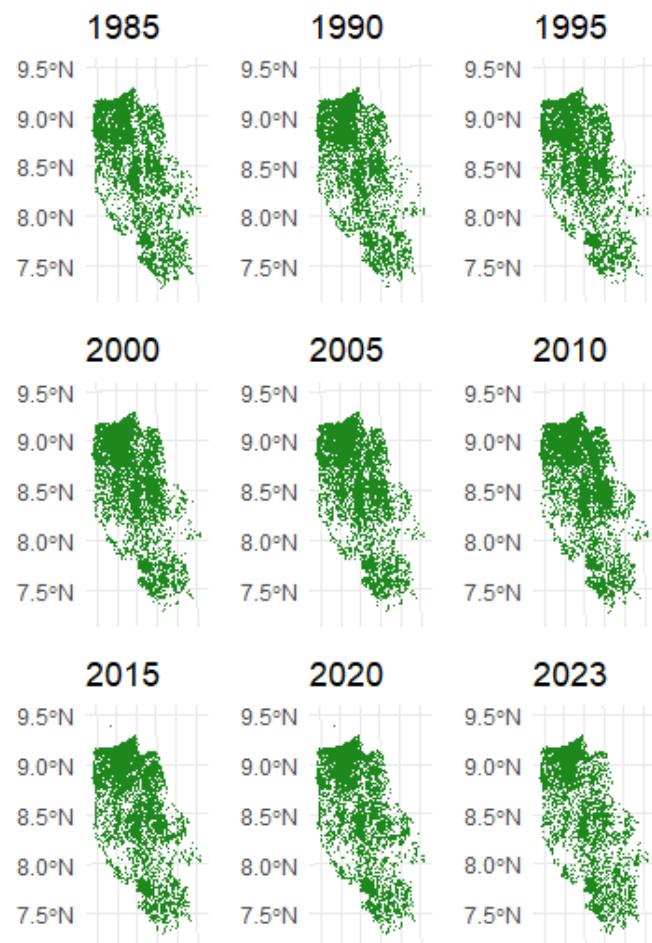


Figura 2

Evolución de la cobertura de bosque en la cuenca colombiana del Catatumbo entre 1985 y 2023.

Evolución de la cobertura 1985–2023

Serie de mapas comparativos



El análisis se apoya en información secundaria de coberturas y uso del suelo proveniente de la plataforma MapBiomas Colombia, fuente secundaria de acceso libre con respaldo institucional la cual ofrece series temporales anuales desde 1985 hasta 2023. Los datos poseen una resolución espacial de 30 m, generados a partir de imágenes satelitales Landsat y validados mediante metodologías participativas y procesos automatizados (MapBiomas Colombia, s.f.). Para el presente estudio se seleccionaron únicamente las clases correspondientes a bosque, dado que constituyen el principal hábitat de interés para evaluar la conectividad ecológica en la ecorregión.

Para evaluar la estructura y la conectividad del paisaje se emplea el índice de Área conexa equivalente y su variación en el tiempo (dECA), el cual permite cuantificar la conectividad ecológica efectiva entre fragmentos de hábitat considerando tanto la composición como la disposición espacial de los parches (Saura et al., 2010). El índice resulta adecuado para el presente estudio al integrar métricas de fragmentación y conectividad en un solo valor comparable a lo largo del tiempo y entre escenarios geográficos, lo cual facilita el análisis multitemporal. Se utilizó una probabilidad de dispersión de 0.05 y un umbral de distancia de

5000 metros, adecuado para el análisis de patrones a nivel regional, para realizar el cálculo haciendo uso del paquete Makurhini en Rstudio.

Resultados

El análisis multitemporal de conectividad en la ecorregión del Catatumbo, calculado a partir del índice dECA con cortes quinquenales entre 1985 y 2023, evidencia dinámicas fluctuantes en la conectividad del bosque (Figura 3, figura 4). El área de hábitat presenta una ligera disminución a lo largo del periodo analizado, pasando de 911.888 ha en 1985 a 889.210 ha en 2023, lo que representa una pérdida neta de 22.678 ha. Sin embargo, este cambio no fue lineal, ya que entre 2000 y 2010 se registró un aumento progresivo del área de bosque, alcanzando su máximo en 2010 (962.461 ha), para posteriormente disminuir de manera constante en la última década.

El índice de área conexa equivalente siguió una tendencia similar, con valores iniciales de 875.361 ha en 1985 y finales de 850.176 ha en 2023. A pesar de que en algunos cortes se presentaron incrementos —particularmente entre 2000 y 2010, cuando el ECA superó los 930.000 ha—, la trayectoria general estuvo marcada por reducciones, especialmente a partir de 2015, lo que refleja una pérdida neta de conectividad.

Figura 3

Proporción de hábitat, hábitat perdido y hábitat conectado de la cobertura de bosque en la cuenca colombiana del Catatumbo entre 1985 y 2023.

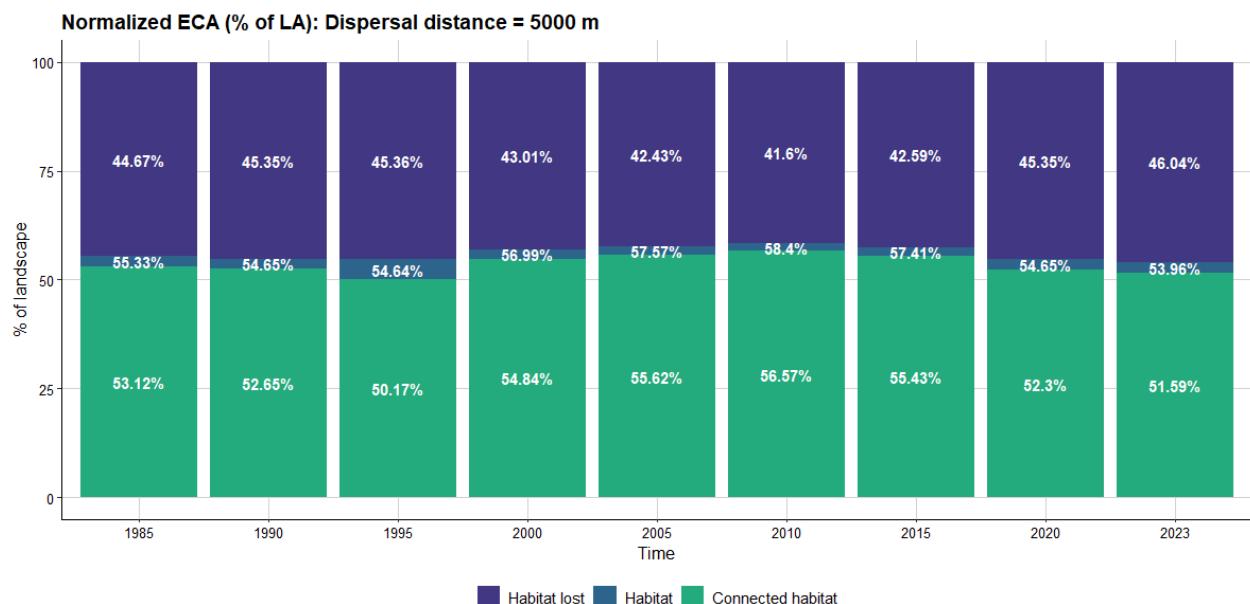


Figura 4

Métricas de conectividad de la cobertura de bosque en la cuenca colombiana del Catatumbo entre 1985 y 2023.

Time	Max. Landscape attribute (ha)	Habitat area (ha)	Distance threshold	ECA (ha)	Normalized ECA (% of LA)	Normalized ECA (% of habitat area)	dA	dECA	rECA	dA/dECA comparisons	Type of change
1985	1648028	911888.7	5000	875361.7	53.116	95.994	-44.668	-46.884	1.0496105	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss
1990	1648028	900674.7	5000	867644.0	52.647	96.333	-1.230	-0.882	0.7170732	dA < dECA < 0	+ Habitat loss
1995	1648028	900445.8	5000	826857.5	50.173	91.828	-0.025	-4.701	188.0400000	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss
2000	1648028	939292.0	5000	903713.8	54.836	96.212	4.314	9.295	2.1546129	dECA or dA gain	Habitat or connectivity gain
2005	1648028	948810.2	5000	916658.9	55.622	96.611	1.013	1.432	1.4136229	dECA or dA gain	Habitat or connectivity gain
2010	1648028	962461.5	5000	932229.0	56.566	96.859	1.439	1.699	1.1806810	dECA or dA gain	Habitat or connectivity gain
2015	1648028	946085.5	5000	913437.5	55.426	96.549	-1.701	-2.016	1.1851852	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss
2020	1648028	900669.6	5000	861861.9	52.297	95.691	-4.800	-5.646	1.1762500	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss
2023	1648028	889210.0	5000	850176.1	51.587	95.610	-1.272	-1.356	1.0660377	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss

En cuanto a los cambios relativos de hábitat y conectividad (dA y dECA), en primer lugar, hubo pérdidas importantes entre 1985 y 1990, nuevamente en los años 1995, 2015, 2020 y 2023; en todos estos periodos la pérdida de conectividad fue superior a la de hábitat. En segundo lugar, hubo ganancias entre 2000 y 2010, y este fue el periodo mejor conectado. La conectividad interna se mantuvo constante (ECA normalizado entre 51.5% y 56.6%).

Discusión

La conectividad en la ecorregión del Catatumbo ha disminuido progresivamente desde 2010, al igual que el hábitat, a pesar de haber experimentado una fase de recuperación entre 2000 y 2010. Esto demuestra que la pérdida de cobertura boscosa no siempre representa pérdida de conectividad. No obstante, a partir del año 2015 se evidencia una inversión de la tendencia, hacia reducción simultánea de conectividad y cobertura; el balance final es negativo, ya que en 2023 los valores de conectividad son menores a aquellos del periodo inicial de 1985. Murillo-Sandoval et al. (2022) encontraron un patrón similar para la región de transición andino-amazónica, donde las pérdidas de conectividad fueron más pronunciadas que la reducción en la cobertura, reflejando procesos de fragmentación y aislamiento de parches más allá de la simple deforestación.

En el caso del Catatumbo, estas dinámicas pueden relacionarse con las transformaciones sociopolíticas de la región. El periodo de recuperación entre 2000 y 2010 coincide con una intensificación del conflicto armado en la zona, donde las restricciones de acceso y control territorial limitaban en cierta medida la expansión de actividades antrópicas. No obstante, al igual que lo documentan Murillo-Sandoval et al. (2022) para el posacuerdo de paz en Colombia, a partir de 2016 se observa una aceleración en la pérdida de hábitat y conectividad, posiblemente asociada a la expansión de cultivos ilícitos, ganadería y procesos de colonización tras el reacomodo de actores armados. Esto refuerza la idea de que los períodos de menor intensidad de conflicto pueden generar mayores presiones sobre los ecosistemas debido al aumento de la ocupación y transformación del territorio.

Desde una perspectiva ecológica, la reducción progresiva del dECA tiene implicaciones directas sobre la viabilidad de poblaciones de especies dependientes del bosque, especialmente aquellas con dispersión limitada. Aunque el ECA normalizado respecto al hábitat se mantuvo alto ($>90\%$), lo cual sugiere que los fragmentos remanentes mantienen conectividad interna, la pérdida neta de bosque y la reducción de la conectividad funcional pueden afectar procesos de dispersión, flujo génico y resiliencia ecológica, aumentando la vulnerabilidad frente a eventos de perturbación y al cambio climático.

Aunque estos hallazgos son esclarecedores, se limitan únicamente a una clase de bosque, sin considerar otros tipos de hábitats que pueden aportar a la conectividad funcional; además, se utilizan unos parámetros muy generalizados que no necesariamente reflejan las necesidades de especies focales con diferente movilidad.

Para fortalecer estudios de esta índole en el futuro se sugiere incorporar un análisis de sensibilidad con diferentes umbrales de distancia y probabilidades de dispersión, para así explorar escenarios de conectividad para diferentes especies. También se puede enriquecer con la identificación de hotspots de pérdida de conectividad, siguiendo la metodología propuesta por Murillo-Sandoval et al. (2022), lo cual permitiría priorizar áreas críticas para la conservación y la gestión transfronteriza. Por último, un análisis muy rico podría incluir variables sociopolíticas para profundizar la relación entre transformaciones del paisaje y dinámicas humanas, dado el carácter estratégico y conflictivo del Catatumbo.

Conclusiones

El análisis multitemporal de la ecorregión del Catatumbo evidenció una tendencia general de pérdida de conectividad ecológica y de hábitat desde 2010, precedida por una fase de recuperación entre 2000 y 2010. Aunque la reducción de cobertura boscosa no siempre implicó pérdida de conectividad, a partir de 2015 ambas dinámicas coincidieron en un deterioro simultáneo, alcanzando en 2023 valores de conectividad inferiores a los registrados en 1985. Estos hallazgos confirman que los procesos de fragmentación y desconexión del hábitat pueden ser más severos que la mera deforestación, lo que coincide con estudios en otras regiones de Colombia (Murillo-Sandoval et al., 2022). Así también, se resalta la influencia de las dinámicas sociopolíticas sobre el paisaje: mientras los períodos de mayor intensidad del conflicto armado parecen haber limitado la expansión de actividades antrópicas, los escenarios de posconflicto y reacomodo territorial han favorecido la deforestación y la fragmentación.

Desde el punto de vista de la conservación, la reducción del dECA implica riesgos para la movilidad, el flujo génico y la resiliencia de especies dependientes del bosque, incluso cuando la conectividad relativa interna de los fragmentos se mantiene elevada ($>90\%$). Esto plantea la necesidad de acciones de manejo orientadas a mantener y restaurar la conectividad, más allá de la simple protección de la cobertura boscosa. En este sentido, se recomienda priorizar áreas críticas para la conservación mediante la identificación de hotspots de pérdida de conectividad, fortalecer esquemas de gestión transfronteriza entre Colombia y Venezuela, e integrar enfoques socioecológicos que reconozcan la estrecha relación entre las dinámicas

del conflicto, la ocupación humana y la transformación del paisaje. De esta manera, se podrán diseñar estrategias de manejo más efectivas para garantizar la integridad ecológica y funcional del Catatumbo en el largo plazo.

Literatura citada

- Aponte, A., Ebus, B. & Vargas Reina, J. (2022). Conflicto Violento y Deterioro Ambiental en el Catatumbo.
- Forero-Medina G, Joppa L. (2010). Representation of Global and National Conservation Priorities by Colombia's Protected Area Network. *PLoS ONE* 5(10): e13210. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013210>
- Hilty, J., Worboys, G. L., Keeley, A., Woodley, S., Lausche, B. J., Locke, H., Carr, M., Pulsford, I., Pittock, J., White, J. W., Theobald, D. M., Levine, J., Reuling, M., Watson, J. E., Ament, R., & Tabor, G. M. (2020). Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors. *Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 30*. Gland, Switzerland: IUCN. <https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2020.pag.30.en>
- López, J., Qian, Y., Murillo-Sandoval, P. J., Clerici, N., & Eklundh, L. (2024). Landscape connectivity loss after the de-escalation of armed conflict in the Colombian Amazon (2011–2021). *Global Ecology And Conservation*, 54, e03094. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03094>
- MapBiomass Colombia. (s. f.). <https://colombia.mapbiomas.org/proyecto/>
- Murillo-Sandoval, P. J., Clerici, N., & Correa-Ayram, C. (2022). Rapid loss in landscape connectivity after the peace agreement in the Andes-Amazon region. *Global Ecology And Conservation*, 38, e02205. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02205>
- Negret, P. J., Sonter, L., Watson, J. E. M., Possingham, H. P., Jones, K. R., Suarez, C., Ochoa-Quintero, J. M., & Maron, M. (2019). Emerging evidence that armed

- conflict and coca cultivation influence deforestation patterns. *Biological Conservation*, 239, 108176. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2019.07.021>
- Ortega Lara, A., Lasso-Alcalá, O., Lasso, C., Andrade de Pasquier, G., Bogotá-Gregory, J. (2012). Peces de la subcuenca del río Catatumbo, cuenca del Lago de Maracaibo, Colombia y Venezuela. *Biota Colombiana*. 13. https://www.researchgate.net/publication/374299540_Peces_de_la_subcuenca_del_rio_Catatumbo_cuenca_del_Lago_de_Maracaibo_Colombia_y_Venezuela_a
- Sánchez-Cuervo, A.M., Aide, T.M. Consequences of the Armed Conflict, Forced Human Displacement, and Land Abandonment on Forest Cover Change in Colombia: A Multi-scaled Analysis. (2013). *Ecosystems* 16, 1052–1070. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9667-y>
- Saura, S., Estreguil, C., Mouton, C., & Rodríguez-Freire, M. (2010). Network analysis to assess landscape connectivity trends: Application to European forests (1990–2000). *Ecological Indicators*, 11(2), 407-416. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.06.011>
- Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., & Merriam, G. (1993). Connectivity Is a Vital Element of Landscape Structure. *Oikos*, 68(3), 571–573. <https://doi.org/10.2307/3544927>
- UNODC. (2022). *Informe mundial sobre las drogas 2022* (publicación de las Naciones Unidas, 2022).

Anexos

Anexo 1. Código en R desarrollado.

```

# Prueba 1

library(Makurhini)
library(sf)
library(ggplot2)
library(RColorBrewer)
library(parallel)
library(patchwork)

c85<-read_sf("D:/Escritorio/TdG Vi/coberturas Col/proyectadas/+1ha/CB_mmu85.shp")
pai<-read_sf("D:/Escritorio/TdG Vi/area de estudio/cuenca Col/cc.shp")

ggplot() +
  geom_sf(data = pai, aes(color = "Area de estudio"), fill = NA, linewidth = 0.7) +
  geom_sf(data = c85, aes(color = "Parches"), fill = "turquoise", linewidth = 0.5) +
  scale_color_manual(name = "",
                      values = c("Area de estudio" = "red",
                                "Parches" = "black")) +
  theme_minimal() +
  theme(axis.title.x = element_blank(),
        axis.title.y = element_blank())

c90 <- read_sf("D:/Escritorio/TdG Vi/coberturas Col/proyectadas/+1ha/CB_mmu90.shp")
c95 <- read_sf("D:/Escritorio/TdG Vi/coberturas Col/proyectadas/+1ha/CB_mmu95.shp")
c00 <- read_sf("D:/Escritorio/TdG Vi/coberturas Col/proyectadas/+1ha/CB_mmu00.shp")
c05 <- read_sf("D:/Escritorio/TdG Vi/coberturas Col/proyectadas/+1ha/CB_mmu05.shp")
c10 <- read_sf("D:/Escritorio/TdG Vi/coberturas Col/proyectadas/+1ha/CB_mmu10.shp")
c15 <- read_sf("D:/Escritorio/TdG Vi/coberturas Col/proyectadas/+1ha/CB_mmu15.shp")
c20 <- read_sf("D:/Escritorio/TdG Vi/coberturas Col/proyectadas/+1ha/CB_mmu20.shp")
c23 <- read_sf("D:/Escritorio/TdG Vi/coberturas Col/proyectadas/+1ha/CB_mmu23.shp")

lista_parches <- list("1985" = c85,
                      "1990" = c90,
                      "1995" = c95,
                      "2000" = c00,
                      "2005" = c05,
                      "2010" = c10,
                      "2015" = c15,
                      "2020" = c20,
                      "2023" = c23)
length(lista_parches)
names(lista_parches)

p1 <- ggplot() +
  geom_sf(data = c85, fill = "forestgreen", color = NA) +
  ggtitle("1985") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(),
        axis.ticks.x = element_blank())

p2 <- ggplot() +
  geom_sf(data = c90, fill = "forestgreen", color = NA) +
  ggtitle("1990") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(),
        axis.ticks.x = element_blank())

p3 <- ggplot() +
  geom_sf(data = c95, fill = "forestgreen", color = NA) +
  ggtitle("1995") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(),
        axis.ticks.x = element_blank())

```

```

p4 <- ggplot() +
  geom_sf(data = c00, fill = "forestgreen", color = NA) +
  ggtitle("2000") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(),
        axis.ticks.x = element_blank())

p5 <- ggplot() +
  geom_sf(data = c05, fill = "forestgreen", color = NA) +
  ggtitle("2005") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(),
        axis.ticks.x = element_blank())

p6 <- ggplot() +
  geom_sf(data = c10, fill = "forestgreen", color = NA) +
  ggtitle("2010") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(),
        axis.ticks.x = element_blank())

p7 <- ggplot() +
  geom_sf(data = c15, fill = "forestgreen", color = NA) +
  ggtitle("2015") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(),
        axis.ticks.x = element_blank())

p8 <- ggplot() +
  geom_sf(data = c20, fill = "forestgreen", color = NA) +
  ggtitle("2020") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(),
        axis.ticks.x = element_blank())

p9 <- ggplot() +
  geom_sf(data = c23, fill = "forestgreen", color = NA) +
  ggtitle("2023") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(),
        axis.ticks.x = element_blank())

wrap_plots(p1, p2, p3,
           p4, p5, p6,
           p7, p8, p9,
           ncol = 3) +
  plot_annotation(
    title = "Evolución de la cobertura 1985-2023",
    subtitle = "Serie de mapas comparativos"
  )

Max_atributo <- as.numeric(st_area(pai)) * 0.0001
Max_atributo

dECA_test <- MK_dECA(nodes= lista_parches,
                      attribute = NULL,
                      area_unit = "ha",
                      distance = list(type= "edge", keep = 0.1),
                      metric = "PC",
                      probability = 0.05,
                      distance_thresholds = 5000,
                      LA = Max_atributo,
                      plot= c("1985", "1990", "1995", "2000", "2005", "2010", "2015", "2020",
"2023")),

```

```
intern = TRUE)
```

```
dECA_test$dECA_table
```