

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

Milena Cambroneró Quesada

1. Introducción

El cantón de Atenas se encuentra hacia el oeste del Valle Central de Costa Rica, en la provincia de Alajuela. El paisaje en esta zona es heterogéneo, caracterizado por remanentes de bosque ripario y con una matriz urbana y agrícola, dominada por cultivos de café, hacia el norte del cantón y hacia el sur por potreros y plantaciones de mangos, naranjas, y otros. Algunos de los fragmentos de bosque del cantón protegen nacientes de agua potable que abastecen a unas 12000 personas (40% de los habitantes del cantón). En estos sitios hemos detectado la presencia de 19 especies de mamíferos medianos y grandes, incluyendo especies amenazadas localmente como el puma (*Puma concolor*), el yaguarundi (*Herpailurus yagouaroundi*), el ocelote (*Leopardus pardalis*), y la nutria (*Lontra longicaudis*; Cambroneró et al., 2023).

Estudios preliminares muestran que las nacientes de agua potable de la parte norte del cantón se encuentran vulnerables ante la contaminación agrícola y se han identificado sitios prioritarios de conservación, que permitan aumentar la cobertura forestal alrededor de las nacientes (Arguedas, 2022). Considerando que los esfuerzos de conservación deberían ser multipropósito, uno de nuestros objetivos principales es identificar sitios prioritarios de conservación y de conectividad, que permitan a distintas especies de mamíferos medianos y grandes habitar o moverse en este paisaje, mientras se protegen también las fuentes de agua potable del cantón. Con la información generada esperamos contribuir con el manejo integral de las dos cuencas hidrográficas que se encuentran en Atenas.

2. Metodología

Sitio de estudio

El cantón de Atenas (Alajuela, Costa Rica) presenta un área de 126.3 km², variando desde los 200 a los 1300 msnm. En las partes altas del cantón predomina el bosque húmedo premontano y en las partes bajas el bosque de transición a bosque seco. Las áreas protegidas más cercanas se encuentran a aproximadamente 20 km al noreste, 25 km al noroeste y 20 al suroeste. El sitio se ubica en la vertiente Pacífica, presentando una estacionalidad marcada, con una época seca de diciembre a abril y una época lluviosa de mayo a diciembre, con una precipitación anual de unos 3000 mm.

Datos utilizados

La capa de cobertura forestal corresponde al año 2023 y se obtuvo del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) a través de la plataforma del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).

Análisis de datos

Para analizar la fragmentación y conectividad del paisaje se utilizó el paquete Makurhini (Godínez-Gómez et al. 2025), en R Studio (versión 4.5.1). Para obtener las métricas de fragmentación del paisaje se utilizó la función *MK_Fragmentation*, utilizando un efecto de borde de 250 m, ya que al utilizar 500 m recomendado por Haddad et al. (2015) el nivel de área núcleo se reduce a cero en toda el área de estudio. Para describir el paisaje se utilizaron las siguientes métricas de nodo: área de núcleo (considerando un efecto de borde de 250 m), porcentaje de borde, relación perímetro-área e índice de forma.

Para analizar la conectividad del paisaje se utilizó la función *MK_dPCIIC*, la cual calcula tanto la conectividad global del paisaje como la contribución de cada fragmento para mantener la conectividad del paisaje. Se utilizó el delta del índice de Probabilidad de Conectividad (dPC) utilizando cuatro métricas, (i) el dPC que corresponde al aporte total de cada fragmento a la conectividad global del paisaje, (ii) el “Intra” que indica el porte del parche por sí mismo, (iii) el “Flux” que se refiere al aporte del parche como origen o destino de conexiones hacia otros parches y (iv) “Connector” que mide el papel del parche como conector entre áreas (“stepping stones”).

3. Resultados:

Fragmentación del paisaje

El área de estudio tiene 332 fragmentos, correspondientes a un área de 5151.4 ha (40.8% del área total). El promedio de los fragmentos es de 15.52 (± 93.9) ha, con un 98.2% de los fragmentos con tamaños menores a 100 km². El área núcleo utilizando una distancia de borde de 250 m representa un 1.2% del área total de los fragmentos. El valor de Cority es muy reducido (0.02), aún utilizando una longitud de borde de 250 m, indicando un paisaje altamente fragmentado (Tabla 1). Además, el promedio del índice de forma es de 0.16, indicando fragmentos de formas muy irregulares.

Tabla 1. Métricas a nivel de paisaje en Atenas, Alajuela, Costa Rica.

Métrica	Valor
Área de los fragmentos (ha)	5151.4
Número de fragmentos	332
Tamaño promedio de los fragmentos (ha) \pm desviación estándar	15.52 \pm 93.9
Fragmentos menores a 100 km ²	326
Porcentaje de fragmentos menores a 100 km ²	98.2
Borde total (m)	740.30
Densidad del borde (km ²). Borde total/área de los fragmentos	0.14
Densidad de fragmentos	2.63

Área núcleo (ha) basada en una distancia de 250 m	60.80
Cority. Medida de fragmentación	0.02
Índice de forma (promedio)	0.16

Como se observa en la Figura 1 la mayor parte de los fragmentos tienen un tamaño y perímetro reducidos, y un índice de forma bajo, menor a 0.25. Utilizando una distancia de efecto de borde de 250 m el fragmento con la mayor área núcleo y por tanto, menor área de borde corresponde al área conocida como Reserva Andrómeda (Figs. 2A, 2B). Los fragmentos con los mayores valores de relación perímetro-área se encuentran hacia el sur del cantón, correspondiente al borde del Río Grande de Tárcoles (Fig. 2C). Los fragmentos con el mayor índice de forma se encuentran hacia el noreste del cantón y corresponden a los bosques riparios de los ríos Cacao y Grande (Fig. 2D).

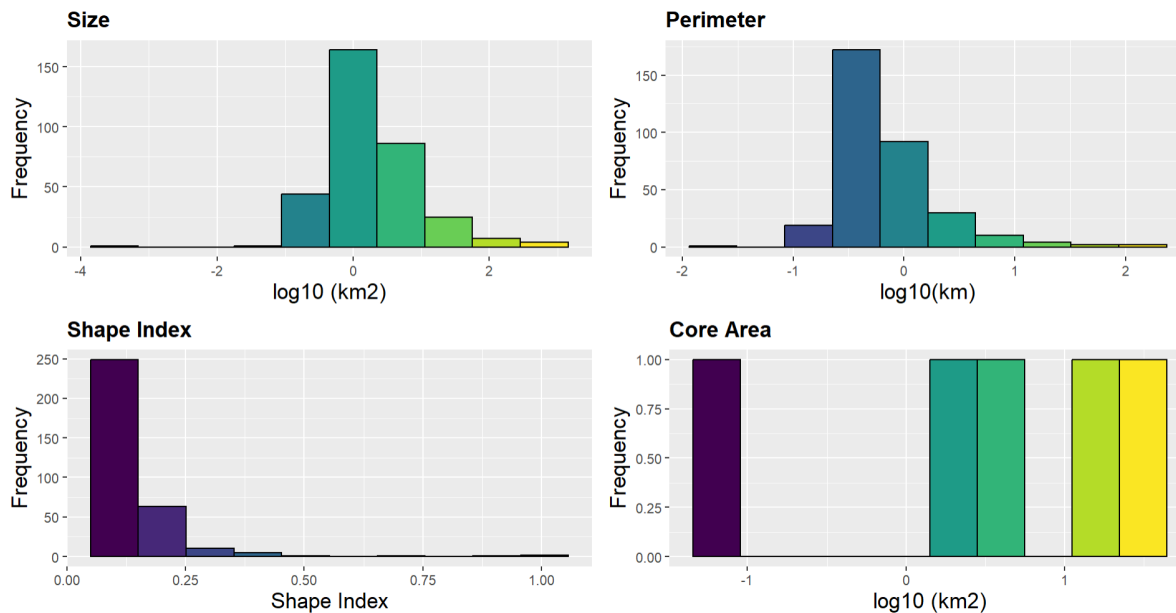


Figura 1. Métricas de tamaño, perímetro, índice de forma y área núcleo para 332 fragmentos de bosque en Atenas (Alajuela, Costa Rica).

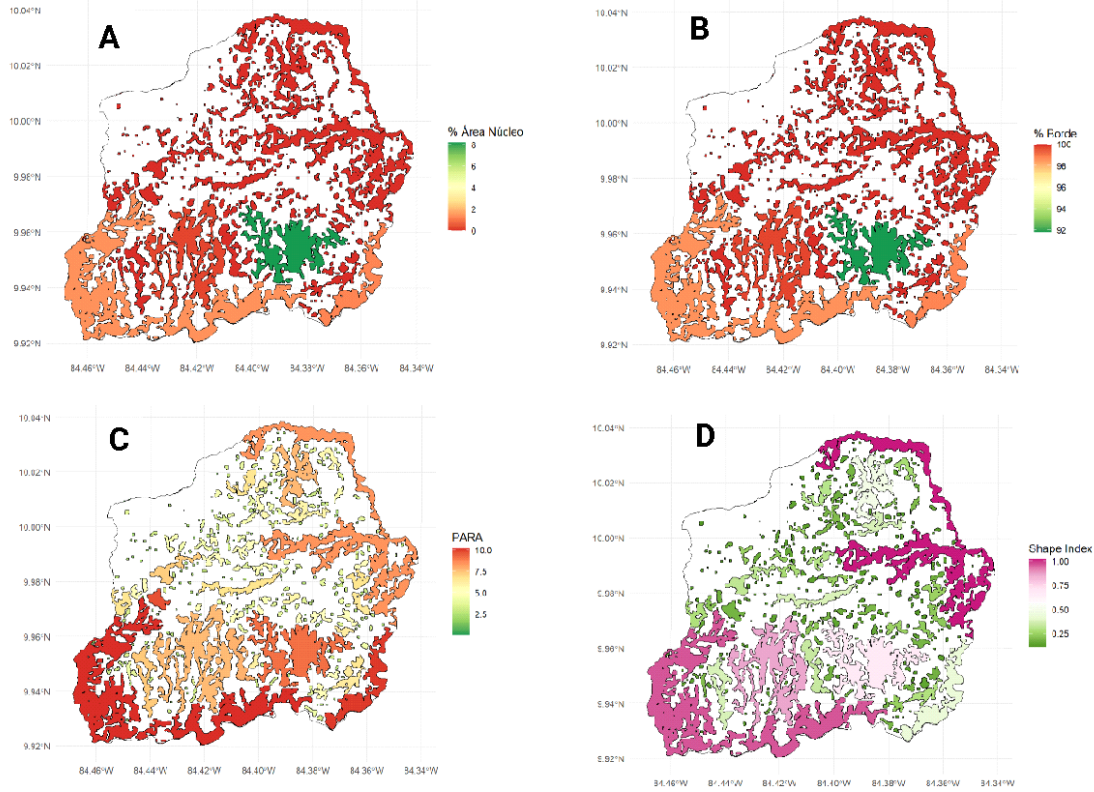


Figura 2. Métricas de fragmentación a nivel de nodo en Atenas (Alajuela, Costa Rica). **A.** Porcentaje de área de núcleo considerando un efecto de borde de 250 m. **B.** Porcentaje de borde. **C.** Relación perímetro-área. **D.** Índice de forma.

Conectividad del paisaje

Los índices dPC, el dPCIntra, dPCFlux y dPCConnector presentaron los mayores valores en parches asociados a bosques riparios a lo largo del Río Grande de Tárcoles, hacia el sur del cantón y de los Ríos Grande y Cacao hacia el noreste (Figs. 3A, 3B, 3C, 3D). Esto indica que tales fragmentos son relevantes para la conectividad global, así como para el flujo de individuos en estas regiones.

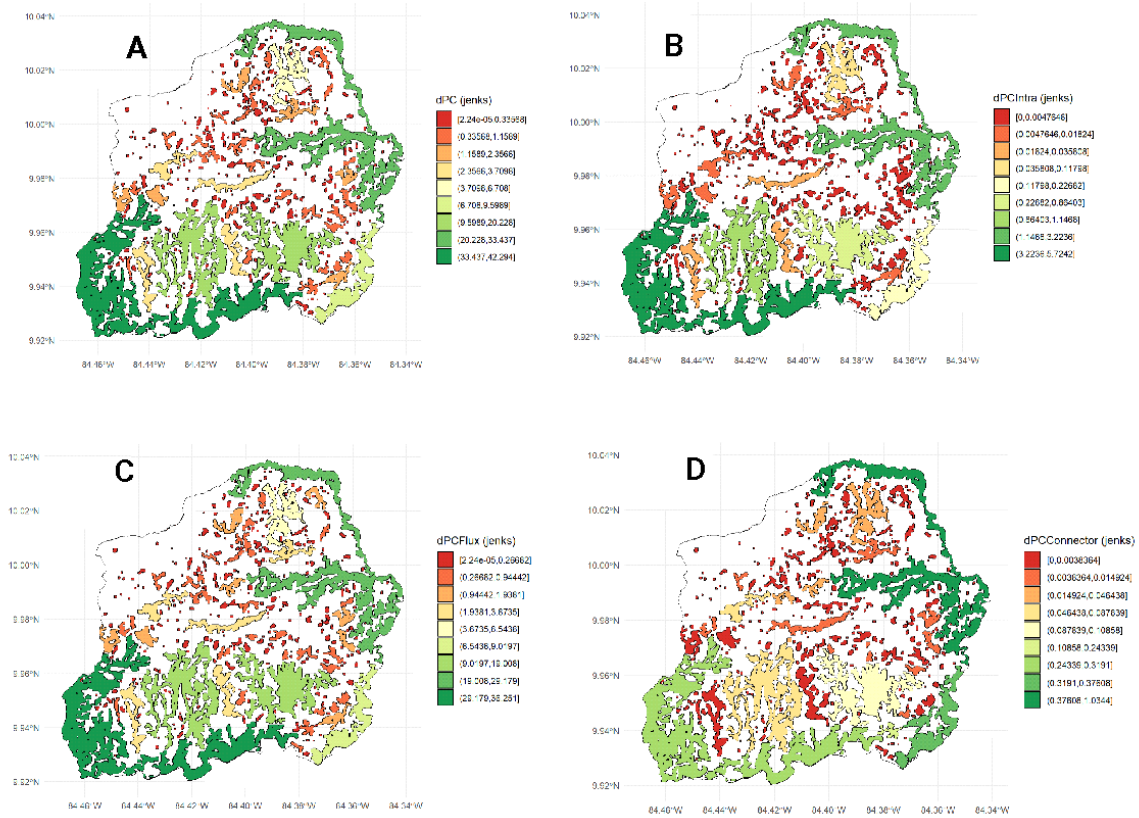


Figura 3. Delta del índice de Probabilidad de Conectividad (dPC) en Atenas (Alajuela, Costa Rica), correspondiente a **A.** aporte total del parche a la conectividad global del paisaje, **B.** Aporte del parche por sí mismo, **C.** Flujo de dispersión correspondiente al aporte del fragmento como origen o destino de conexiones a otros parches y **D.** Aporte del parche como paso intermedio entre otros parches (“stepping stones”).

4. Discusión:

Los análisis de fragmentación del paisaje muestran una alta división del área boscosa, con 332 fragmentos, la mayoría de los cuales son menores a 100 km², lo que los hace menos capaces de sostener poblaciones viables de especies de mamíferos grandes o sensibles a la perturbación (Chiarello, 2008). Además, el área núcleo, es decir, aquella parte del bosque menos afectada por el efecto de borde, representa solo el 1.2% del área total de los fragmentos, mientras que el índice de forma indica la presencia de fragmentos de formas muy irregulares. Esto reduce aún más el valor ecológico de estos fragmentos, generando condiciones microclimáticas más adversas y mayor exposición a perturbaciones humanas (Fischer et al. 2021).

Sin embargo, dentro de este contexto degradado, se identifican fragmentos clave que podrían servir como núcleos de conservación y como conectores dentro del paisaje. La Reserva

Andrómeda, por ejemplo, destaca como el fragmento con la mayor área núcleo. Cabe destacar que esta zona es propensa a incendios forestales y que cerca del 80% de la misma se quemó en el año 2020. Dado esto, resulta crítico establecer medidas prioritarias de conservación para este sitio. Del mismo modo, los bosques riparios de los ríos Cacao, Grande y Grande de Tárcoles, en la periferia del cantón, presentan fragmentos con altos valores de índice de forma, lo que indica una configuración más favorable para conservar especies sensibles.

En cuanto a la conectividad, los índices dPC, dPCIntra, dPCFlux y dPCConnector señalan que los fragmentos ubicados a lo largo del Río Grande de Tárcoles, al sur del cantón, y los asociados a los ríos Grande y Cacao en el noreste, son fundamentales para el mantenimiento de la conectividad funcional del paisaje. Estos parches no solo facilitan el movimiento de especies, sino que también podrían actuar como corredores ecológicos que permiten la recolonización de hábitats, la dispersión de semillas y el flujo genético entre poblaciones aisladas.

Estos hallazgos subrayan la importancia de priorizar la conservación de los bosques riparios y de fortalecer la conectividad entre fragmentos clave, mediante la restauración de corredores biológicos y la implementación de prácticas de manejo sostenible del paisaje. Asimismo, la coincidencia geográfica entre estos fragmentos y las cuencas hidrográficas de importancia para el abastecimiento de agua potable del cantón sugiere que las acciones de conservación no solo beneficiarán a la biodiversidad, sino también a la seguridad hídrica de las comunidades locales.

Finalmente, una de las principales limitaciones de este análisis radica en que la información disponible para la cobertura forestal no distingue entre bosques primarios y secundarios, lo que puede influir en la manera en que los organismos utilizan este hábitat. El análisis muestra la relevancia de los parches de bosque hacia el noreste y sur del cantón, mientras que las áreas más vulnerables en términos de la protección del recurso hídrico se ubican en el noroeste. En estas zonas, también se han detectado gran cantidad de especies de mamíferos medianos y grandes (Cambronero et al., 2023). Es recomendable complementar los análisis identificando rutas prioritarias de conectividad y de restauración, las cuales deberían enfocarse en la parte norte del cantón, donde se encuentra la mayor cantidad de nacientes de agua potable.

5. Conclusión:

La información generada permite identificar con claridad los principales desafíos y oportunidades para un manejo integral del paisaje en Atenas. La alta fragmentación del bosque exige acciones urgentes orientadas a conservar y restaurar áreas estratégicas que favorezcan tanto la conectividad ecológica como la protección de los recursos hídricos. Son de particular relevancia las áreas de bosque ripario a largo de los ríos, Grande, Cacao y Grande de Tárcoles. Este enfoque integrado es esencial para garantizar la resiliencia del ecosistema y la sostenibilidad del territorio a largo plazo.

6. Referencias

- Arguedas, M. (2022). *Propuesta metodológica para identificar sitios priorizados para restaurar ecosistemas con fines de protección del recurso hídrico: Estudio de caso de la microcuenca del Río Cacao, Atenas, Alajuela* [Trabajo final de graduación aplicada sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía para optar por el grado de título de Maestría Profesional en Sistemas Información Geográfica y Teledetección]. Universidad de Costa Rica.
- Cambronero, M., Sánchez-Calderón, R., & Lobo, R. (2023). Medium and large-sized mammals in a premontane moist forest fragment, Atenas, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 71(1), e53245. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v71i1.53245>
- Chiarello, A. G. (2000). Density and Population Size of Mammals in Remnants of Brazilian Atlantic Forest. *Conservation Biology*, 14(6), 1649-1657. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2000.99071.x>
- Fischer, R., Taubert, F., Müller, M. S., Groeneveld, J., Lehmann, S., Wiegand, T., & Huth, A. (2021). Accelerated forest fragmentation leads to critical increase in tropical forest edge area. *Science Advances*, 7(37), eabg7012. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abg7012>
- Godínez-Gómez, O., Correa-Ayram, C., Goicolea, T., & Saura, S. (2025). *Makurhini: An R package for comprehensive analysis of landscape fragmentation and connectivity*. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6398746/v1>
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., Lovejoy, T. E., Sexton, J. O., Austin, M. P., Collins, C. D., Cook, W. M., Damschen, E. I., Ewers, R. M., Foster, B. L., Jenkins, C. N., King, A. J., Laurance, W. F., Levey, D. J., Margules, C. R., ... Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2), e1500052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>

7. Material anexo:

```
setwd("C:/Users/Usuario/Desktop/Curso Conectividad_RedBioma/Proyecto Final/Datos")
```

```
wd <- getwd()
setwd(wd)
```

```
library(devtools)
library(remotes)
library(Makurhini)
library(sf)
library(ggplot2)
library(RColorBrewer)
```

```

habitat_nodes <- read_sf("C://Users/Usuario/Desktop/Curso Conectividad_RedBioma/Proyecto
Final/Datos/CoberturaForestal2023_Atenas.shp")
nrow(habitat_nodes)
paisaje <- read_sf("C://Users/Usuario/Desktop/Curso Conectividad_RedBioma/Proyecto
Final/Datos/LimitsAtenas.shp")

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = habitat_nodes, aes(color = "Parches"), fill = "forestgreen", linewidth = 0.5) +
  scale_color_manual(name = "", values = "black")+
  theme_minimal() +
  theme(axis.title.x = element_blank(),
        axis.title.y = element_blank())

```

```

area_paisaje <- st_area(paisaje)
area_paisaje <- unit_convert(area_paisaje, "m2", "ha")

```

```

Fragmentacion <- MK_Fragmentation(nodes = habitat_nodes,
                                   edge_distance = 250,
                                   min_node_area = 100,
                                   landscape_area = area_paisaje,
                                   area_unit = "ha",
                                   perimeter_unit = "km",
                                   plot = TRUE)

```

```

#Fragmentación a nivel de parche
#% de área de núcleo

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`, aes(fill = CAPercent), color = "black",
size = 0.1) +
  scale_fill_distiller(
    palette = "RdYlGn",
    direction = 1,
    name = "% Área Núcleo"

```



```

) +
theme_minimal() +
labs(
  title = "Fragmentación a nivel de parche",
  fill = "% Área Núcleo"
) +
theme(
  legend.position = "right",
  plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

## %borde

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`, aes(fill = EdgePercent), color = "black",
size = 0.1) +
  scale_fill_distiller(
    palette = "RdYlGn",
    direction = -1,
    name = "% Borde"
  ) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Fragmentación a nivel de parche",
    fill = "% Borde"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

#Perímetro área ratio

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`, aes(fill = PARA), color = "black", size =
0.1) +
  scale_fill_distiller(

```

```

    palette = "RdYlGn",
    direction = -1,
    name = "PARA"
  ) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Fragmentación a nivel de parche",
    fill = "PARA"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

#shape index

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`, aes(fill = ShapeIndex), color = "black",
size = 0.1) +
  scale_fill_distiller(
    palette = "PiYG",
    direction = -1,
    name = "Shape Index"
  ) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Fragmentación a nivel de parche",
    fill = "Shape Index"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

#Estadísticos a nivel de paisaje

class(Fragmentacion)

Fragmentacion$`Summary landscape metrics`
##Conectividad global del paisaje

```

```

area_paisaje <- st_area(paisaje)
area_paisaje <- unit_convert(area_paisaje, "m2", "ha")

PC <- MK_dPCIIC(nodes = habitat_nodes,
  attribute = NULL,
  area_unit = "ha",
  distance = list(type = "edge", keep = 0.1),
  LA = area_paisaje,
  onlyoverall = FALSE,
  metric = "PC",
  probability = 0.5,
  distance_thresholds = 10000,
  intern = TRUE) #10 km

library(classInt)
library(dplyr)

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(PC$dPC, n = 9, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
PC <- PC %>%
  mutate(dPC_q = cut(dPC,
    breaks = breaks$brks,
    include.lowest = TRUE,
    dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = PC, aes(fill = dPC_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "dPC (jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "dPC",
    fill = "dPC"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

```

```

)

#dPC Intra

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(PC$dPCintra, n = 9, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
PC <- PC %>%
  mutate(dPC_q = cut(dPCintra,
                     breaks = breaks$brks,
                     include.lowest = TRUE,
                     dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = PC, aes(fill = dPC_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "dPCintra (jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "dPCintra",
    fill = "dPCintra"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

#dPCFlux

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(PC$dPCflux, n = 9, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
PC <- PC %>%
  mutate(dPC_q = cut(dPCflux,
                     breaks = breaks$brks,
                     include.lowest = TRUE,
                     dig.lab = 5))

```

```

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = PC, aes(fill = dPC_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "dPCFlux (jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "dPCFlux",
    fill = "dPCFlux"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

#dPC Connector

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(PC$dPCconnector, n = 9, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
PC <- PC %>%
  mutate(dPC_q = cut(dPCconnector,
    breaks = breaks$brks,
    include.lowest = TRUE,
    dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = PC, aes(fill = dPC_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "dPCConnector (jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "dPCConnector",
    fill = "dPCConnector"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

```