

# **Análisis de las herramientas utilizadas para calcular el índice de fragmentación desarrollado por Steenmans y Pinborg**

**Sandra Patricia Castellar Martínez**

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Análisis y Modelamiento Espacial

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

ESPECIALIZACIÓN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Manizales, 2022

## TABLA DE CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b> .....   | <b>6</b>  |
| 1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....   | 7         |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....   | <b>8</b>  |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL .....  | 8         |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 8         |
| <b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>4. ANTECEDENTES</b> .....  | <b>10</b> |
| 4.1 ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN DE STEENMANS Y PINBORG. ....  | 10        |
| 4.2 HERRAMIENTAS SIG.....   | 12        |
| 4.3 MACHINE LEARNING Y SIG .....  | 14        |
| <b>5. REFERENTE TEÓRICO</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>6. METODOLOGÍA</b> .....   | <b>18</b> |
| 6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO Y TIPO DE ESTUDIO .....  | 18        |
| 6.2 PROCEDIMIENTO.....  | 18        |
| 6.2.1 Fase 1: Describir las herramientas utilizadas para el cálculo del índice de fragmentación<br>propuesto por Steenmans y Pinborg.....   | 19        |
| 6.2.2 Fase 2: Comparación de métodos para el cálculo del índice de fragmentación propuesto por<br>Steenmans y Pinborg.....                  | 20        |
| 6.2.3 Fase 3: Evaluación de herramientas disponibles para el cálculo del índice de fragmentación<br>propuesto por Steenmans y Pinborg. .... | 20        |
| 6.2.4 Fase 4: Análisis de los resultados.....   | 21        |
| 6.2.5 Fase 5: conclusiones y recomendaciones.....   | 21        |
| <b>7. RESULTADOS</b> .....  | <b>22</b> |
| 7.1 ELEMENTOS QUE COMPONEN LA METODOLOGÍA PROPUESTA POR STEENMANS Y PINBORG .....   | 22        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 7.2        | HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN.....        | 24        |
| 7.2.1      | <i>Matrix Green Toolbox</i> .....   | 24        |
| 7.2.2      | <i>PEPPSALT (ILWIS 3.2)</i> .....   | 26        |
| 7.2.3      | <i>IndiFrag v2.1</i> .....  | 27        |
| 7.2.4      | <i>Fragstat</i> .....   | 27        |
| 7.2.5      | <i>Frag scape</i> .....   | 28        |
| 7.2.6      | <i>ArcPy</i> .....  | 28        |
| 7.3        | COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN.....         | 29        |
| 7.3.1      | <i>PEPPSALT (ILWIS 3.3)</i> .....   | 31        |
| 7.3.2      | <i>IndiFrag v2.1</i> .....  | 35        |
| 7.3.3      | <i>Herramientas alternas</i> .....  | 36        |
| 7.3.4      | <i>Comparación de métodos para el cálculo del índice de fragmentación</i> ..... | 39        |
| <b>8.</b>  | <b>CONCLUSIONES</b> .....   | <b>41</b> |
| <b>9.</b>  | <b>RECOMENDACIONES</b> .....  | <b>44</b> |
| <b>10.</b> | <b>REFERENCIAS</b> .....  | <b>45</b> |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. <i>Ejemplo de aplicación del índice de fragmentación a una celda de cálculo de 2 km de lado.</i>                                   | 16 |
| Figura 2. Esquema metodológico   | 19 |
| Figura 3. <i>Diagrama de aplicación del índice de fragmentación a una celda de cálculo de 1x1 km de lado.</i>                                | 23 |
| Figura 4. <i>Como usar la herramienta Matrix Green</i>   | 24 |
| Figura 5. <i>Ilustración de la forma como opera el filtro binario PEPPSALT</i>   | 26 |
| Figura 6. Zona de estudio.   | 30 |
| Figura 7. Aplicación del filtro de PEPPSALT al área de estudio. a) Zona de estudio con el filtro PEPPSALT, b) Zona de estudio sin el filtro. | 31 |
| Figura 8. Valoración del índice de fragmentación calculado luego de aplicar el filtro PEPPSALT   | 33 |
| Figura 9. Resultados del índice calculado en el POMCA Directos Río Magdalena – Brazo Morales – Río Boque – NSS.                              | 34 |
| Figura 10. Métricas del paisaje calculadas con IndiFrag.   | 36 |
| Figura 11. Comunicación con los investigadores de la Matrix Green Toolbox.   | 37 |
| Figura 12. Métricas del paisaje calculadas con Fragstats   | 38 |
| Figura 13. Plugin Frascap en el entorno QGIS   | 39 |

## **Lista de tablas**

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Cálculo del índice de fragmentación luego de la aplicación del filtro PEPPSALT<br>.....                       | 32 |
| Tabla 2. Resultados del índice calculado en el POMCA Directos Río Magdalena – Brazo<br>Morales – Río Boque – NSS. .... | 33 |
| Tabla 3. Métodos para el cálculo del índice de fragmentación.....  | 40 |

# 1. Planteamiento del problema de investigación

En la Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas entregada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año 2014 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), se especifican los indicadores que se deben calcular en la etapa de diagnóstico, dentro de estos se encuentra el Índice de fragmentación que cuantifica el grado o tipo de fragmentación de los diferentes tipos de coberturas naturales de la tierra; el cual se debe calcular con la metodología propuesta por Steenmans y Pinborg que para muchos usuarios no es clara o difícil de aplicar.

La fragmentación de los ecosistemas ocurre a nivel de paisaje, cuando un ecosistema se subdivide en porciones más pequeñas, geométricamente más complejas y aisladas, como resultado tanto de procesos naturales como de actividades humanas. El índice de fragmentación diseñado por Steenmans y Pinborg no se aplica a cada cobertura, sino que establece sólo dos tipos de categorías para el análisis: Áreas sensibles y áreas no sensibles las cuales representan áreas con cobertura vegetal natural y la cobertura transformada o no vegetal natural, respectivamente.

Este proceso se hace a partir del uso de la capa en formato raster de usos del suelo, mediante la identificación de las celdillas sensibles conectadas, las celdillas sensibles; y los complejos sensibles. Esto hace que el procedimiento del cálculo sea variable y dependa en su totalidad del tamaño de la cuenca o área de estudio, los conocimientos y experiencias del técnico que aplica la metodología. Esto puede generar que los procesos sean ineficientes y demorados, ocasionando sobrecostos y menor rendimiento en los proyectos.

De acuerdo con lo anterior, se hace necesario evaluar las herramientas disponibles actualmente para el cálculo del índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg y

proponer cual de las herramientas estudiadas es la más eficiente o fácil de usar para el cálculo del índice.

## **1.1 Formulación del problema**

¿Qué herramientas se encuentran disponibles para facilitar el cálculo del índice de fragmentación - IF diseñado por Steenmans y Pinborg, con el fin de disminuir la cantidad de horas empleadas por los profesionales y dar cumplimiento a los índices exigidos por la guía POMCA para caracterización de la cuenca dentro del componente biofísico?

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Describir y analizar herramientas para calcular el índice de fragmentación desarrollado por Steenmans y Pinborg

### **2.2 Objetivos específicos**

- Describir los parámetros que componen el índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg
- Evaluar herramientas para el cálculo del índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg.
- Comparar métodos para el cálculo del índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg

### **3. Justificación**

El índice de fragmentación planteado por Steenmans & Pinborg, para la EEA (European Environment Agency) considera la fragmentación de los ecosistemas en términos de conectividad, estableciendo sólo dos tipos de categorías para el análisis: Áreas sensibles y áreas no sensibles; las cuales representan áreas con cobertura vegetal natural y la cobertura transformada o no vegetal natural, respectivamente; a partir de la implementación de análisis espaciales sustentados en datos de tipo ráster, mediante el empleo de mapas de usos del suelo.

La metodología para el análisis de los mapas y posterior cálculo del índice de fragmentación utilizada actualmente tiene un alto grado de cálculo no unificado, lo que podría generar resultados no comparables entre cuencas hidrográficas, ya que no se garantiza la misma escala de análisis. Otra desventaja de la metodología que se emplea actualmente para el cálculo del índice es que depende de los conocimientos y experiencias del técnico que aplica la metodología, lo que genera que los procesos sean ineficientes, ocasionando sobrecostos y menor rendimiento en los proyectos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario evaluar las herramientas disponibles actualmente para el cálculo del índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg y determinar cuáles pueden ser utilizadas como pre procesamiento o si aplican completamente para calcular el índice; ya que de esta manera se podría limitar la intervención del usuario más allá de la introducción de los datos de entrada a una herramienta, de esta manera se podrían disminuir la cantidad de horas empleadas por los profesionales, se lograría un impacto en los procesos de las empresas generando un mayor rendimiento en los tiempos de entrega de los proyectos y generaría menores costos por la contratación de profesionales o técnicos auxiliares.

## **4. Antecedentes**

### **4.1 Índice de fragmentación de Steenmans y Pinborg.**

El índice diseñado por Steenmans y Pinborg (2000) analiza la superposición de los datos de cobertura terrestre con una cuadrícula regular de celdas, se evalúa la distribución de complejos naturales dentro de una celda. Para cada celda se determina cuantos complejos naturales se encuentran en ella y establece sólo dos tipos de categorías para el análisis: Áreas sensibles y áreas no sensibles las cuales representan áreas con cobertura vegetal natural y la cobertura transformada o no vegetal natural, respectivamente. Este proceso se hace mediante la identificación de las celdillas sensibles conectadas, las celdillas sensibles; y los complejos sensibles. Se considera que la infraestructura tiene un efecto lineal (corte) en áreas sensibles y que todos los píxeles naturales y semi-naturales conectados (es decir, áreas sensibles) se combinan en un solo complejo natural.

Como lo indican Triviño Pérez, Vicedo Maestre, & Soler Capdepón (2007) el índice propuesto por Steenmans y Pinborg pretende ser un indicador que ayude a entender la complejidad del paisaje, expresando la conectividad de áreas potencialmente interesantes para su conservación, sobre todo, de aquellas que se encuentran muy presionadas por las actividades humanas (urbanización, industria o agricultura) o por la presencia de grandes ejes de comunicación terrestre. Por esta razón, el índice gravita en torno a los usos del suelo, discriminando los que por sus características naturales son susceptibles de ser considerados sensibles a procesos de fragmentación, de aquellos otros usos que generan una presión sobre los anteriores o no participan en posibles impactos a causa de una supuesta neutralidad. Por tanto, para la aplicación del índice es primordial disponer de una capa georreferenciada de usos del suelo cuya nomenclatura permita distinguir entre usos sensibles y usos no sensibles.

Por su parte Corredor (2019) en su tesis concluye que en la revisión del método diseñado por Steenmans y Pinborg existen dificultades en su fundamento y utilización, la no definición de parámetros tales como el tamaño de celda provocan resultados insatisfactorios especialmente a la hora de describir áreas con Poca y Mínima fragmentación, no hay diversidad apreciable de los rangos y sus categorías, puesto que el análisis se realizó con celdas de solo 2 km de lado, alterando de forma importante los resultados finales pero describiendo de forma razonable solamente categorías como Fuerte y Extrema fragmentación.

Dependiendo de las zonas de estudio, así como la extensión de las mismas se puede determinar potencialidades utilizando la metodología planteada por Steenmans y Pinborg, esto lo indica Tituaña en su tesis (2015) indicando que es una metodología que puede adaptarse a cualquier escala, pero que si bien es aconsejable trabajar con escala medias (1:50.000 o 1:100.000), también se puede obtener datos con escalas mayores a 1:100.000, el error que arrojaran estas escalas será alto pero servirá para un primer diagnóstico. El utilizar celdas de cálculo o complejos permite evaluar toda el área de estudio, evitando generar sitios sin información. Por último, Permite obtener varias alternativas para el análisis en base al tamaño de cada complejo, teniendo una adaptabilidad extraordinaria a cada zona de estudio.

En su estudio Sangiorgi e Irali (2011) desarrollaron una metodología para calcular un Índice de Fragmentación de Infraestructura (IFI) basado en el método propuesto por la Agencia Europea de Medio Ambiente (Steenmans & Pinborg, 2000), modificado y mejorado específicamente para dar cuenta de la presencia y características de la infraestructura de transporte, permitiendo evaluar la fragmentación paisajística de un área teniendo en cuenta tanto los efectos de la ruptura física de áreas naturales debido a intervenciones humanas (desarrollos urbanos, infraestructura de transporte, etc.) como la "presión" que producen sobre las áreas naturales.

Sangiorgi e Irali concluyen que el método propuesto representa una herramienta útil para la evaluación de ingeniería de la fragmentación del paisaje producida por las infraestructuras de transporte en función de su tipo y características geométricas y funcionales, de esta manera, mediante el cálculo del IFI, se puede estimar la sostenibilidad ecológica de un proyecto en términos de fragmentación del paisaje.

Por su parte, Velasco (2018) en sus tesis resalta la importancia del índice de Fragmentación como insumo para determinar las características del sistema natural y sus servicios ecosistémicos que definirán los instrumentos que permitan la protección de ecosistemas estratégicos. Indica que es un criterio que permite conocer el grado de fragilidad del ecosistema, ya que, en condiciones de fragmentación extrema, se determina un ecosistema en alto grado de degradación y posibles cambios irreversibles en cuanto a sus características y los bienes y servicios que provee.

## **4.2 Herramientas SIG**

Con la ayuda de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) y los sensores remotos se puede evaluar y cuantificar con precisión los sitios que más fragmentación del territorio tienen. Como lo indican Triviño Pérez, Vicedo Maestre, & Soler Capdepón (2007) en el campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) los análisis de sensibilidad están relacionados con la elaboración de modelos matemáticos pensados para facilitar la comprensión y el estudio de realidades complejas como son las vinculadas a cuestiones ambientales, ellos concluyen que el análisis de sensibilidad del índice de fragmentación se ha estructurado en dos partes, considerando, de un lado, la rasterización de los usos del suelo, y, del otro, la validez de los resultados en función los tamaños de celda y de celdilla. En cuanto a las cuestiones relativas al error superficial provocado por la transformación al sistema raster de los usos del suelo, no se observan errores

importantes; la cantidad de error es directamente proporcional al tamaño de la celdilla, aunque habría que resaltar el hecho de que el tamaño de la celda de cálculo influye en el resultado.

Hysa & Türer Başkaya (2017) en su estudio presentaron un método para visualizar y cuantificar la fragmentación del paisaje físico utilizando la caja de herramientas Matrix Green y el analista espacial de densidad de ArcGIS. Investigando la capacidad de conexión de los parches a través de posibles enlaces de borde a borde. Los resultados visuales representan la distribución espacial de la fragmentación del paisaje en el territorio. Considerando que, la evaluación cuantitativa a través de estadísticas de parches de características, mediciones de enlaces e indicadores PDA designan pruebas numéricas sobre la capacidad de respuesta de la fragmentación del paisaje a las alteraciones de la cobertura terrestre.

Cerrato, Maldonado, & Ñañez (2017) en su estudio destacan la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica -SIG- como una herramienta indispensable en la actualidad para la solución de problemas ambientales y toma de decisiones; en el estudio se emplearon los SIG a manera que permitieran la zonificación de áreas prioritarias para la conservación. Una vez obtenido la fragmentación según la metodología de Steenmans y Pinborg sobre el área de la cuenca baja del río Ranchería, se procedió a la aplicación de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica - SIG para la definición de los corredores biológicos que permitirán recuperar y conservar las coberturas vegetales existentes. Para dicha definición se utilizaron las funciones de la extensión "Spatial analyst tools" del Software ArcGis versión 10.5 con las herramientas "Cost Distance", "Cost Back Link" y "Cost Path", de igual forma otras herramientas como por ejemplo "Weighted Overlay", "raster to polygon", "slope" y "reclassify".

Carlos Ponce (2008) en su estudio utilizó el filtro binario PEPPSALT (ILWIS 3.2) para calcular el índice de Fragmentación según la metodología de Steenmans y Pinborg, con cuatro conexiones con el fin de eliminar aquellas áreas naturales que se encontraran aisladas o sin una de las cuatro conexiones (arriba, abajo, izquierda y derecha) a otro pixel de área natural, antes del filtro y después, para saber exactamente cuántos complejos conectados y no conectados existían en dicha celda, luego se apoyó con el programa EXCEL para realizar el cálculo del índice. Finalmente, concluyó que la aplicación de esta metodología generó resultados afines en el área de estudio.

Por su parte Singh, Pandey, & Singh (2014) en su estudio demuestran el probable uso de la teledetección, SIG y FRAGSTAT en la evaluación de la estructura espacial y el cambio de paisaje. En este, el análisis de fragmentación por medio del programa FRAGSTATS3.3 que ofrece una amplia selección de métricas de paisaje y se ha utilizado para cuantificar la estructura del paisaje. Es implementado por tomadores de decisiones y ecologistas para analizar la fragmentación del paisaje y describir las características y componentes de esos paisajes.

### **4.3 Machine Learning y SIG**

Machine Learning es una técnica basada en datos que automatiza la predicción, clasificación y agrupación de datos un conjunto de algoritmos y técnicas que puede involucrar un gran número de datos e información compleja, que lo convierte en un sistema computacionalmente intenso. Puede desempeñar un papel fundamental en la resolución de problemas espaciales en una amplia gama de áreas de aplicación, desde la predicción de inundaciones y deslizamientos hasta la clasificación de imágenes y la detección de patrones espaciales. (Chen & Chen, 2021)

## 5. Referente teórico

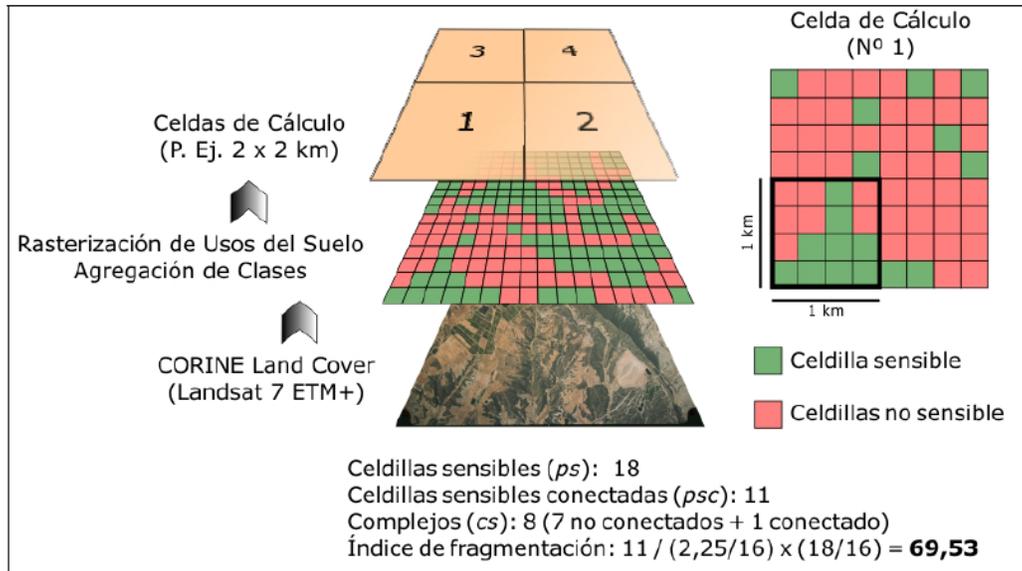
La Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas generada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año (2014), establece los indicadores dentro de la temática de Cobertura y Usos de la tierra para el capítulo de caracterización básica de la cuenca en la Fase de Diagnóstico, en los cuales se encuentra el índice de Fragmentación diseñado por Steenmans & Pinborg, (2000). El cálculo del Índice de Fragmentación de Steenmans y Pinborg (2000), consiste metodológicamente en lo siguiente:

$$\text{Índice de fragmentación} = \frac{psc}{\left(\frac{ps}{cs} \times 16\right) \times \left(\frac{ps}{16}\right)}$$

Donde:

- psc las celdillas sensibles conectadas,
- ps las celdillas sensibles;
- cs los complejos sensibles.
- 16 es el número de grillas. Nota: cada píxel tiene un tamaño de 250 m, por lo tanto, 4x4 = 16 píxeles representan 1 km<sup>2</sup>

**Figura 1.** Ejemplo de aplicación del índice de fragmentación a una celda de cálculo de 2 km de lado.



Fuente: (Triviño Pérez, Vicedo Maestre, & Soler Capdepón, 2007)

Los resultados del índice de fragmentación (IF) se interpretan teniendo en cuenta una escala ordinal y de intervalos que clasifica los valores en seis categorías según (Steenmans & Pinborg, 2000):

- Mínima:  $< 0,01$
- Poca:  $[0,01-0,1]$
- Media:  $[0,1-1]$
- Moderada:  $[1-10]$
- Fuerte:  $[10-100]$
- Extrema:  $\geq 100$

Actualmente se han desarrollado varias herramientas estadísticas que pueden integrarse a los SIG que pueden analizar la fragmentación del paisaje y describir las características y componentes de este. Uno de esos software es FRAGSTATS desarrollado por McGarigal, Cushman, & Ene (2012) en la Universidad de Massachusetts, el cual es un programa de software diseñado para calcular una amplia variedad de métricas de paisaje para patrones de mapas categóricos.

Otra de las herramientas que se encuentra disponible en la actualidad es Landscape Fragmentation Tool v2.0 desarrollada conjuntamente a través de una asociación entre CLEAR (Center for Land Use Education and Research) y Placeways LLC, está diseñada para ser utilizada en el software ArcGIS y permite a los usuarios analizar la fragmentación utilizando su propia información de cobertura terrestre en formato raster. ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios. (ESRI, 2022)

Por su parte, para el Sistema de Información Geográfica QGIS de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License (QGIS, 2022), se han desarrollado varias extensiones y plugin que permiten realizar análisis de índices paisajísticos y estadísticas territoriales; dentro de estos se encuentran Landscape Ecology Statistics (LecoS) y FragScape. El primero trabaja a nivel de pixel para evaluar estadísticamente la distribución de valores y reparto de clases de capas temáticas de naturaleza ráster, a través de variables cualitativas (y los atributos cuantitativos de los pixeles) como los usos del suelo, hábitats o entornos naturales. Y el segundo, permite hacer el análisis de fragmentación del paisaje a partir de unidades de cobertura de suelo trabajando la cartografía de suelos, hábitats o entornos naturales.

## **6. Metodología**

### **6.1 Enfoque metodológico y tipo de estudio**

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque metodológico cuantitativo con un alcance exploratorio, puesto que este estudio tiene pocos antecedentes y con este se busca hacer una recopilación inicial de tipo teórico para luego comparar y evaluar herramientas que permitan calcular el índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg con una herramienta SIG y que permita un menor tiempo de ejecución por parte de los analistas o técnicos especializados.

### **6.2 Procedimiento**

Se describen las actividades que se ejecutarán para lograr el cumplimiento de los objetivos, agrupadas en fases:

**Figura 2.** Esquema metodológico



Fuente: Autor, 2022.

### **6.2.1 Fase 1: Describir las herramientas utilizadas para el cálculo del índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg**

Se realizó una revisión de la bibliografía asociada al cálculo del índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg, se consultaron diferentes publicaciones en donde se trata el tema de los índices de fragmentación de coberturas naturales y métricas del paisaje: Anthropogenic fragmentation of potential semi-natural and natural areas (Steenmans & Pinborg, 2000), Análisis de sensibilidad a factores de escala y propuesta de normalización del índice de fragmentación de hábitats empleado por la agencia europea de medio ambiente (Triviño Pérez, Vicedo Maestre, & Soler Capdepón, 2007), Land Use Fragmentation Analysis Using Remote Sensing and Fragstats (Singh, Pandey, & Singh, 2014).

De igual forma, se hizo la revisión bibliográfica de diferentes herramientas disponibles que puedan realizar dentro de sus matrices cálculos de las métricas del paisaje, de acuerdo al manual de usuario de cada herramienta o la descripción de la misma: MatrixGreen: Landscape Ecological Network Analysis Tool – User manual (Zetterberg & Bodin, 2012), FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012), IndiFrag v2.1: An Object-based Fragmentation Analysis Software Tool (Sapena Moll & Ruiz Fernández, 2016).

### **6.2.2 Fase 2: Comparación de métodos para el cálculo del índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg**

Posterior a la revisión bibliográfica y a la descripción inicial de las herramientas existentes para el cálculo del IF se realizó el análisis de cada una de las herramientas identificadas en la primera fase y sus componentes de acuerdo con lo observado en las publicaciones consultadas y en la guía de usuario donde se presentan las descripciones de todas las métricas de paisaje disponibles en los programas o herramientas.

Por último, se realizó un análisis comparativo para determinar cuál o cuáles de las herramientas descritas en la fase 1 genera el cálculo del IF de manera más eficaz.

### **6.2.3 Fase 3: Evaluación de herramientas disponibles para el cálculo del índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg.**

La automatización surge para reducir el esfuerzo humano requerido en las actividades que podrían ser replicadas por una herramienta o máquina programable, de esta manera se simplifica el trabajo dispendioso, repetitivo o complejo, haciéndolo efectivo, más productivo y disminuyendo costos. Posterior al análisis comparativo, se realizó la evaluación de las herramientas identificadas en las fases 1 y 2.

#### **6.2.4 Fase 4: Análisis de los resultados.**

Luego de que se evaluaran y compararan las herramientas identificadas en la fase 1 se realizó el análisis de los resultados donde se describen cada una de los usos y potencialidades de las herramientas identificadas, así como las desventajas que presentan.

#### **6.2.5 Fase 5: conclusiones y recomendaciones.**

Por último, se generaron las conclusiones de la investigación de acuerdo con los análisis de los resultados obtenidos en la evaluación y comparación de las herramientas identificadas. De igual forma, se realizaron unas recomendaciones para próximos trabajos de estudio.

# 7. Resultados

## 7.1 Elementos que componen la metodología propuesta por Steenmans y Pinborg

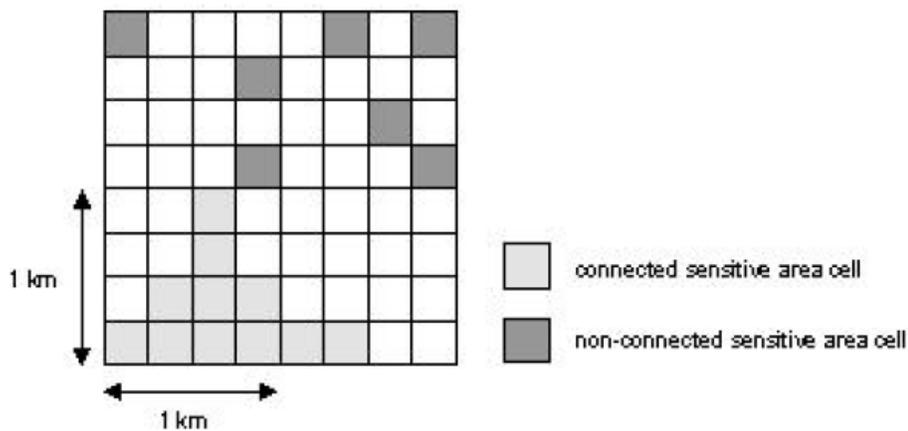
El índice de fragmentación propuesto por Steenmans y Pinborg calcula el grado de conectividad de las áreas naturales y seminaturales presentes en una zona de estudio que luego es ajustada a una celda de cálculo. Todas las áreas naturales y seminaturales adyacentes se combinan en un complejo 'natural' individual. Las zonas no adyacentes siguen siendo complejos naturales independientes.

Las áreas artificializadas, como la agricultura urbana e intensiva, que expresan un alto impacto antropogénico, tienen un efecto de presión sobre los espacios naturales. Se considera que las infraestructuras y demás áreas artificializadas que atraviesan espacios naturales tienen un efecto de fragmentación y provocan un efecto barrera (impacto que genera en un hábitat o ecosistema una infraestructura que impide la movilidad de las especies) generando espacios o complejos naturales independientes. Las áreas naturales y seminaturales influenciadas por las áreas de presión o las líneas de infraestructura se consideran 'perturbadas', las áreas que quedan se denominan 'remotas'. (Steenmans & Pinborg, 2000)

El índice de fragmentación se calcula por celda de cuadrícula (Ver Figura 3); las celdas son las definidas en las grillas de cálculo; los autores proponen calcular en celdas de 1kmx1km (recuadro rojo). Las celdillas son los píxeles con la información de las coberturas naturales o no naturales de la capa de cobertura en formato raster reclasificada (complejos sensibles y no sensibles respectivamente).

Al superponer los datos de la cobertura terrestre con una cuadrícula regular, se evalúa la distribución de los complejos naturales dentro de una celda de la cuadrícula. Para cada celda de la cuadrícula se investiga cuántos complejos naturales se encuentran dentro de la celda y la compacidad de estos complejos (tamaño promedio del complejo en una celda de la cuadrícula frente al área total de complejos en una celda de la cuadrícula). A partir de estas estadísticas se calcula un índice de fragmentación para cada celda de la cuadrícula.

Figura 3. Diagrama de aplicación del índice de fragmentación a una celda de cálculo de 1x1 km de lado.



Fuente: (Steenmans & Pinborg, 2000)

Se define una cuadrícula regular para evaluar la cantidad de fragmentación antropogénica de las áreas naturales y seminaturales. Para cada celda de la cuadrícula se calcula la cantidad de área natural o seminatural perturbada por la presión. Además, se calcula el número de complejos naturales individuales creados bajo la influencia humana (urbanización, agricultura, transporte). A partir de estas estadísticas, se calcula un índice para una cuadrícula regular, por ejemplo, 25 km x 25 km.

Para evaluar la conectividad de los píxeles naturales y seminaturales se utilizan algoritmos específicos. Los píxeles o grupos de píxeles no conectados siguen siendo complejos (semi)

naturales independientes. Se considera que la infraestructura tiene un efecto lineal (corte) en áreas sensibles. Todos los píxeles naturales y seminaturales conectados (es decir, áreas sensibles) se combinan en un complejo natural individual.

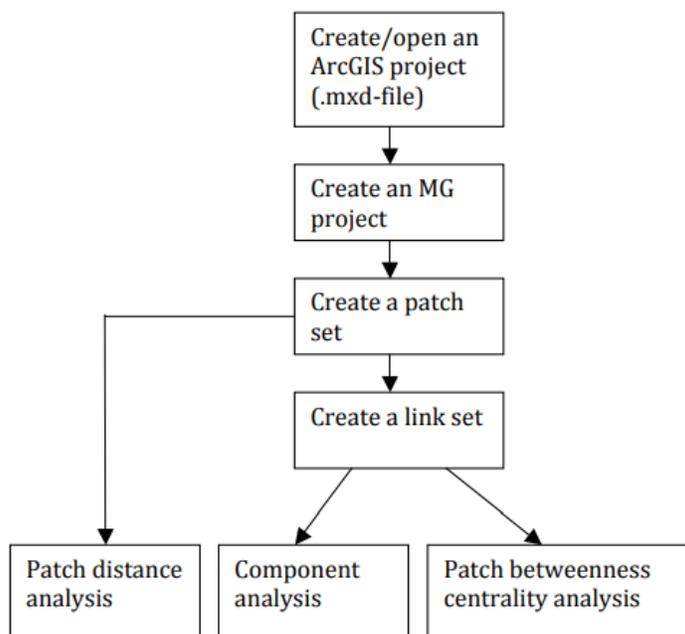
## 7.2 Herramientas utilizadas para el cálculo del índice de fragmentación

A continuación, se relacionan las herramientas identificadas en la revisión bibliográfica que ayudan o se utilizan para calcular índices de fragmentación de paisajes.

### 7.2.1 Matrix Green Toolbox

Matrix Green es una extensión de ArcGIS desarrollada por Bodin y Zetterberg en el Centro de Resiliencia de Estocolmo-KTH, que admite el análisis basado en redes de paisajes fragmentados (BODIN & ZETTERBERG 2010). La caja de herramientas genera parches y tres tipos de enlaces.

Figura 4. Como usar la herramienta Matrix Green



Fuente: MatrixGreen: Landscape Ecological Network Analysis Tool – User manual  
Örjan Bodin & Andreas Zetterberg. Version 0.4, 2012

El análisis de distancia de parches (PDA) genera información sobre el área total de los parches, el área del componente más grande, la relación entre ambos en porcentaje y el número de componentes, generado en cada intervalo de distancia aplicado. PDA ayuda principalmente a comprender el umbral de distancias de borde a borde entre parches de paisaje fragmentados que permite un aumento abrupto en la conectividad de los parches de paisaje, por lo tanto, el tamaño del componente. (Hysa & Türer Başkaya, 2017)

El segundo análisis que se puede realizar es el análisis basado en componentes; un componente es un conjunto de parches que están conectados por una cierta distancia de dispersión. Se puede acceder a cualquier parche dentro de un componente desde cualquier otro parche dentro del componente, pero no desde parches fuera del componente (Zetterberg & Bodin, 2012). Por lo tanto, un componente puede verse como un segmento aislado del paisaje en términos de conectividad. El tamaño del componente es el tamaño total de todos los parches que están conectados. Cuanto menor sea el área total del componente, menor será la probabilidad de que pueda sustentar una población viable. Por lo tanto, el análisis de componentes es particularmente útil cuando se evalúa el nivel de grandes conectividades a escala, es decir, la conectividad desde una perspectiva de paisaje.

Por último, se tiene el Análisis de centralidad de intermediación. Mediante este análisis, se pueden analizar diferentes aspectos (es decir, el nivel de importancia) de los parches y/o enlaces individuales. La centralidad de intermediación es una forma de identificar parches que están situados centralmente dentro de la red desde una perspectiva de conectividad, y esta métrica se ha propuesto como una medida adecuada de la importancia de los parches individuales como trampolín. Los parches con los puntajes de centralidad de intermediación más altos están situados

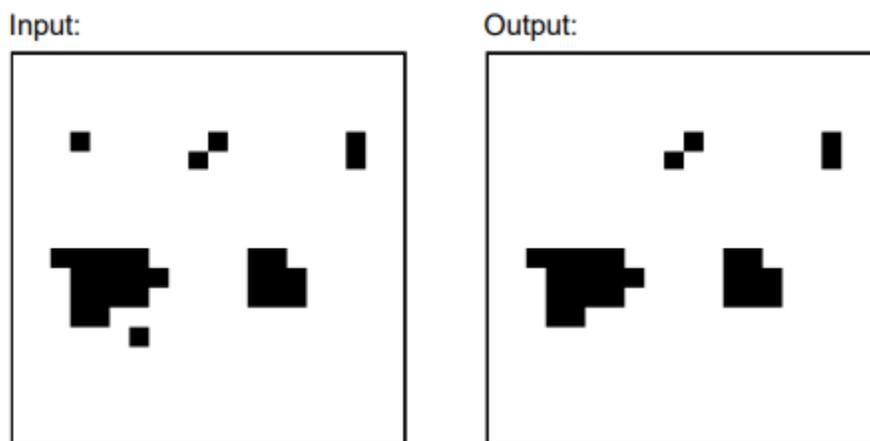
de tal manera que la mayoría de las rutas más cortas entre dos parches cualquiera en el paisaje pasan por estos parches de centralidad de alta intermediación. (Zetterberg & Bodin, 2012)

### 7.2.2 PEPPSALT (ILWIS 3.2)

El filtro Pepper&Salt (PEPPSALT) de ILWIS es un filtro binario estándar que funciona en un entorno 3x3. ILWIS es un software SIG y de teledetección basado en Windows, desarrollado por ITC que comprende un paquete completo de procesamiento de imágenes, análisis espacial y cartografía digital, (ITC, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2022). Este filtro se puede utilizar para eliminar el "ruido" de una imagen. Cuando en el mapa de entrada, el píxel central es 0 y todos los vecinos son distintos de cero, entonces se asignará el valor 1 al píxel central en el mapa de salida.

Cuando en el mapa de entrada, el píxel central es 1 y al menos un vecino también es verdadero, el valor 1 también se asignará al píxel central en el mapa de salida. En otros casos se le asignará el valor 0. El resultado del uso del filtro PEPPSALT es que solo se filtran los píxeles verdaderos únicos y los píxeles falsos únicos.

**Figura 5.** Ilustración de la forma como opera el filtro binario PEPPSALT



Fuente: (Ponce Villacís, 2008)

### **7.2.3 IndiFrag v2.1**

Es una herramienta que permite calcular un conjunto de índices y variables que describen de forma cuantitativa el nivel de fragmentación y la distribución espacial de los usos y coberturas del suelo atendiendo a propiedades morfológicas, espaciales y tipológicas de los objetos cartográficos, así como cuantificar los cambios ocurridos en un periodo de tiempo, todo ello de manera automática. Al trabajar con mapas de coberturas en formato vectorial utiliza las relaciones topológicas, facilitando la interpretación y el análisis de la fragmentación en diferentes áreas de una zona de estudio determinada.

La herramienta compila un gran número de índices y los calcula según varios niveles de jerarquía. Por un lado, los índices de fragmentación están divididos en cinco grupos en función de los atributos que describen: área y perímetro, forma, agregación, diversidad y contraste. Por otro, tanto los índices de fragmentación como los multitemporales están divididos en tres niveles de cálculo en función de la escala: súper-objeto, clase y objeto.

### **7.2.4 Fragstat**

FRAGSTATS es un programa de software gratuito distribuido bajo la licencia pública GNU. Fragstats calcula una amplia variedad de métricas de paisaje para patrones de mapas categóricos. El software original (versión 2) se lanzó al dominio público en 1995 en asociación con la publicación de un Informe Técnico General del Servicio Forestal del USDA (McGarigal y Marks 1995). Desde entonces, cientos de profesionales han disfrutado del uso de FRAGSTATS. Debido a su popularidad, el programa fue completamente revisado en 2002 (versión 3). La última versión pública (v4) se lanzó inicialmente en 2012 y reflejó una importante renovación del software, con una arquitectura completamente rediseñada y una interfaz gráfica de usuario

compatible con una amplia variedad de formatos de imagen y una variedad de métodos de muestreo para analizar subpaisajes. (McGarigal, Cushman, & Ene, 2012)

FRAGSTATS no es compatible con los datos ráster. En su lugar, funciona con cuadrículas enteras en las que a cada celda de la cuadrícula se le asigna directamente un valor entero correspondiente a la clase de tipo de cobertura terrestre que domina esa celda. Por lo tanto, es necesario convertir los mapas raster en cuadrículas de enteros. Por lo general, FRAGSTATS prefiere archivos de cuadrícula de enteros en formato GeoTIFF y/o ASCII. Esta conversión se puede realizar mediante ArcGIS u otro software GIS.

### **7.2.5 Fragscape**

Es un complemento de QGIS 3 para calcular las métricas de fragmentación del paisaje definidas en el documento "División del paisaje, índice de división y tamaño de malla efectivo: nuevas medidas de fragmentación del paisaje" (Jaeger 2000). Entre estas métricas, el tamaño de malla efectivo se ha utilizado ampliamente para cuantificar la fragmentación del paisaje. FragScape define un proceso de 4 pasos desde datos sin procesar hasta métricas calculadas y permite al usuario guardar la configuración para que los resultados se puedan reproducir con el mismo contexto. Ha sido desarrollado por Mathieu Chailloux en INRAE, para el centro de recursos de la red ecológica francesa (impulsado por el ministerio de ecología francés).

### **7.2.6 ArcPy**

ArcPy representa un conjunto de elementos propios de ArcGIS que completan la biblioteca de Python, dando con ello acceso desde la programación al manejo y explotación de información espacial. Proporciona una forma útil y productiva de realizar análisis de datos geográficos, conversión de datos, gestión de datos y automatización de mapas con Python. Este paquete brinda

una experiencia rica y nativa de Python que ofrece finalización de código y documentación de referencia para cada función, módulo, y clase. (ESRI, 2022)

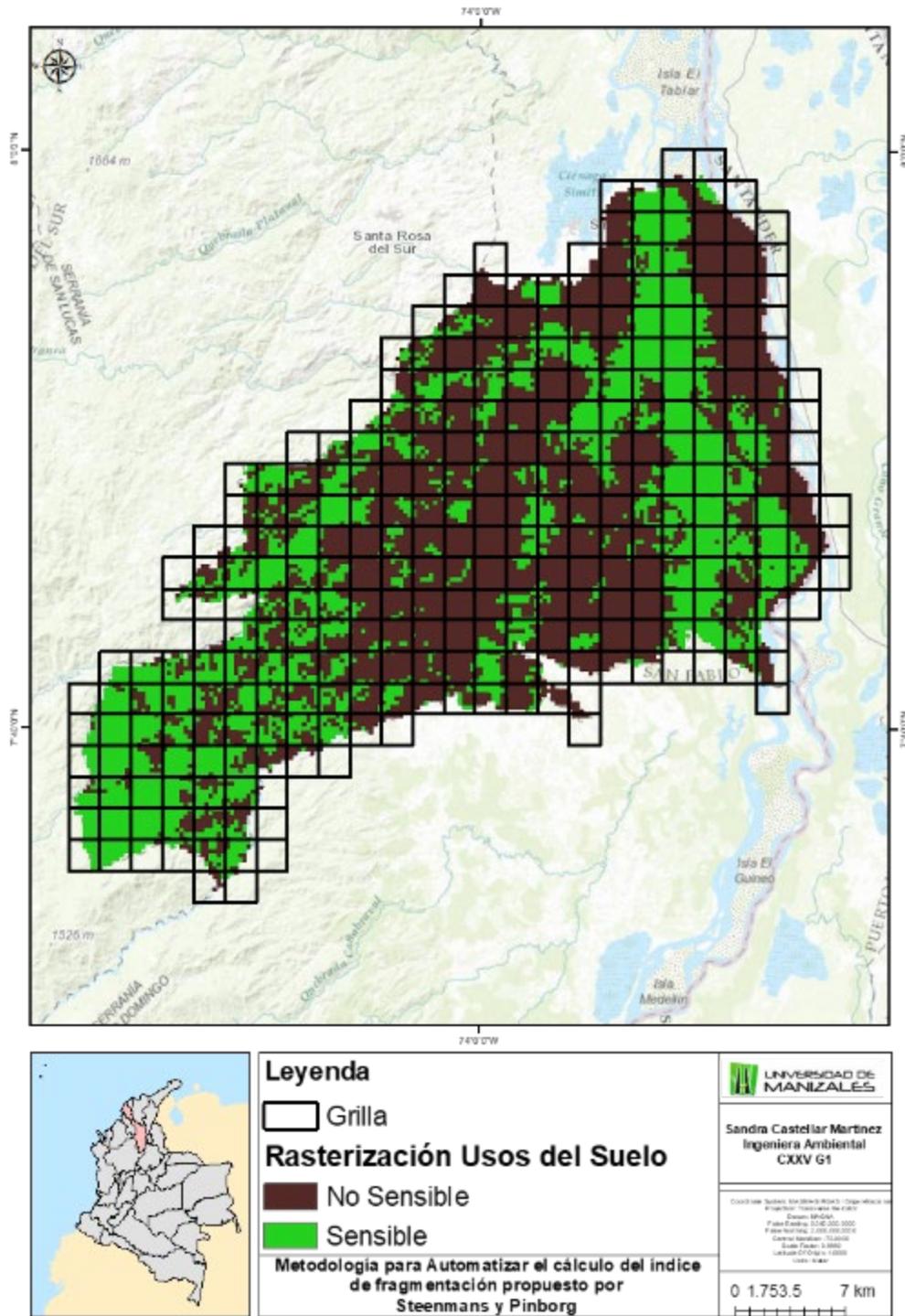
Las aplicaciones de ArcGIS escritas con ArcPy se benefician del desarrollo de módulos adicionales en numerosos nichos de Python, lo cual es beneficioso ya que se pueden usar para automatizar tareas, así como para escribir aplicaciones o complementos.

### **7.3 Comparación de métodos para el cálculo del índice de fragmentación**

En la segunda fase que comprende la comparación de los métodos existentes para el cálculo de los índices de fragmentación se escogió un área de estudio (ver **Figura 6**) para utilizar cada una de las herramientas identificadas en la fase 1. De esta manera, se logra establecer un análisis a partir de los resultados obtenidos con cada una de las herramientas.

Se trabajó con la información encontrada en el POMCA Directos Río Magdalena – Brazo Morales – Río Boque – NSS, específicamente para el municipio de Santa Rosa del Sur en el departamento de Bolívar. Las capas utilizadas fueron: usos del suelo actual (capa rasterizada con la clasificación del tipo de celdillas según el método de Steenmans y Pinborg), grilla para el cálculo del índice de fragmentación y la capa final con los resultados del índice para dicho municipio; esta capa servirá como punto de comparación para las diferentes herramientas y métodos a utilizar en los siguientes subcapítulos.

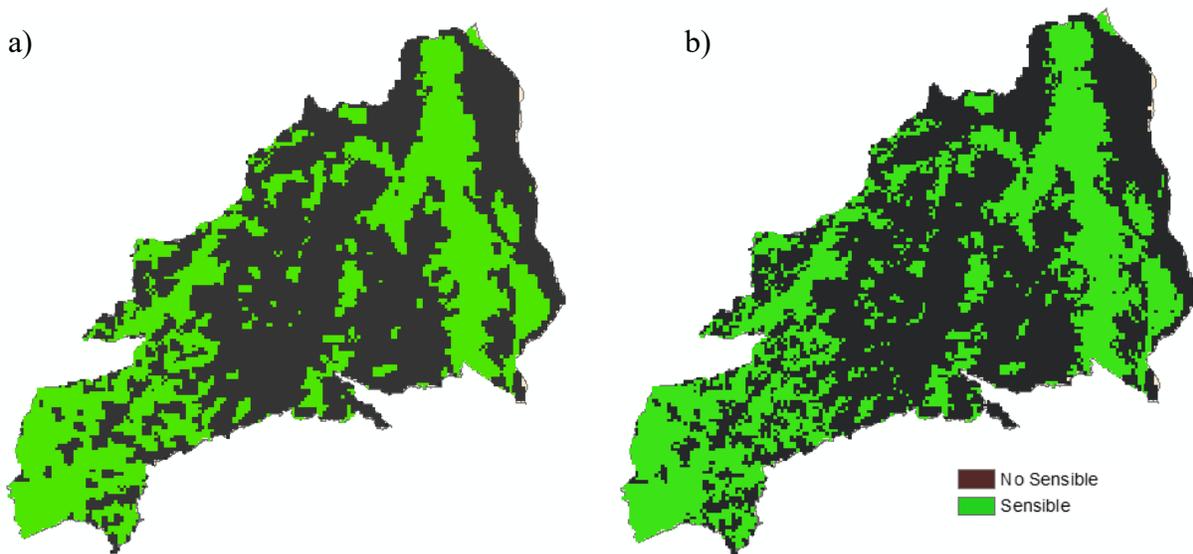
Figura 6. Zona de estudio.



### 7.3.1 PEPPSALT (ILWIS 3.3)

El filtro binario PEPPSALT, permite eliminar aquellas celdas de áreas naturales que se encuentran aisladas, es decir que no se encuentran conectados con otro pixel de área natural. Luego de aplicar el filtro se procede a realizar el cálculo del índice de fragmentación para establecer el grado de variación de la información en cada cuadrante.

Figura 7. Aplicación del filtro de PEPPSALT al área de estudio. a) Zona de estudio con el filtro PEPPSALT, b) Zona de estudio sin el filtro.



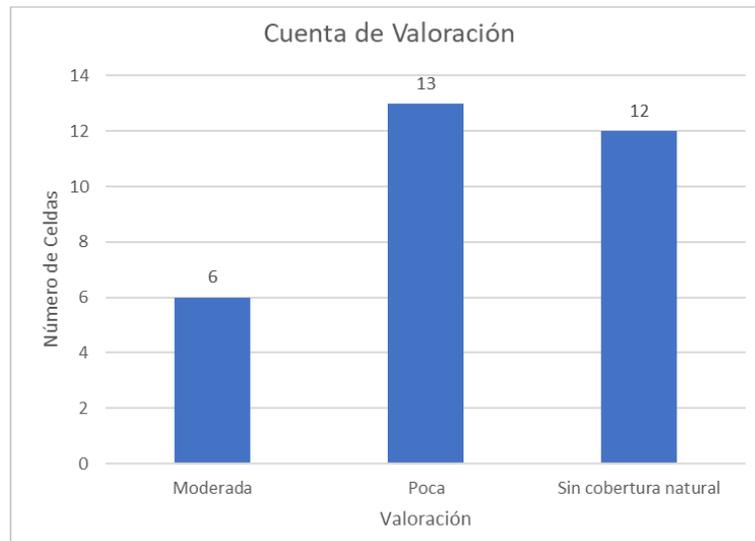
A continuación, se relacionan los resultados obtenidos con la aplicación del filtro; se tomó un 10% del área de manera aleatoria sobre el total de la zona de estudio para comparar con los resultados del índice ya calculado en el POMCA Directos Río Magdalena – Brazo Morales – Río Boque – NSS.

Tabla 1. Cálculo del índice de fragmentación luego de la aplicación del filtro PEPPSALT

| ID  | Celda   | ps | psc | es | (ps/cs*16)*<br>(ps/16) | IF   | Valoración            | Calificación |
|-----|---------|----|-----|----|------------------------|------|-----------------------|--------------|
| 2   | PX      | 3  | 3   | 1  | 9,0                    | 0,33 | Moderada              | 10           |
| 10  | WXII    | 34 | 34  | 1  | 1156,0                 | 0,03 | Poca                  | 15           |
| 13  | ZXII    | 42 | 42  | 1  | 1764,0                 | 0,02 | Poca                  | 15           |
| 16  | CXIII   | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 25  | JXV     | 54 | 54  | 1  | 2916,0                 | 0,02 | Poca                  | 15           |
| 32  | QXV     | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 42  | WXXVI   | 1  | 1   | 1  | 1,0                    | 1,00 | Moderada              | 10           |
| 58  | FXVIII  | 20 | 20  | 1  | 400,0                  | 0,05 | Poca                  | 15           |
| 69  | EXIX    | 38 | 38  | 1  | 1444,0                 | 0,03 | Poca                  | 15           |
| 93  | OXX     | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 98  | TXX     | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 102 | XXX     | 38 | 37  | 2  | 722,0                  | 0,05 | Poca                  | 15           |
| 125 | QXXII   | 2  | 2   | 1  | 4,0                    | 0,50 | Moderada              | 10           |
| 142 | HXXIII  | 50 | 50  | 1  | 2500,0                 | 0,02 | Poca                  | 15           |
| 146 | LXXIII  | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 147 | YXXIII  | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 154 | FXXIV   | 3  | 3   | 1  | 9,0                    | 0,33 | Moderada              | 10           |
| 155 | GXXIV   | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 170 | JXXV    | 26 | 26  | 1  | 676,0                  | 0,04 | Poca                  | 15           |
| 172 | LXXV    | 32 | 32  | 1  | 1024,0                 | 0,03 | Poca                  | 15           |
| 173 | MXXV    | 9  | 9   | 1  | 81,0                   | 0,11 | Moderada              | 10           |
| 184 | XXXV    | 32 | 32  | 2  | 512,0                  | 0,06 | Poca                  | 15           |
| 193 | UXXVI   | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 223 | OXXVIII | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 228 | LXXIX   | 20 | 20  | 1  | 400,0                  | 0,05 | Poca                  | 15           |
| 271 | FXXXIII | 3  | 2   | 1  | 9,0                    | 0,22 | Moderada              | 10           |
| 277 | LXXXIII | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 281 | IXXXIV  | 25 | 25  | 1  | 625,0                  | 0,04 | Poca                  | 15           |
| 283 | KXXXIV  | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 295 | QXXXV   | 0  | 0   | 0  | 0,0                    | 0,00 | Sin cobertura natural | 0            |
| 304 | NXXXVI  | 35 | 35  | 1  | 1225,0                 | 0,03 | Poca                  | 15           |

Fuente: Autor, 2022.

Figura 8. Valoración del índice de fragmentación calculado luego de aplicar el filtro PEPPSALT



Fuente: Autor, 2022.

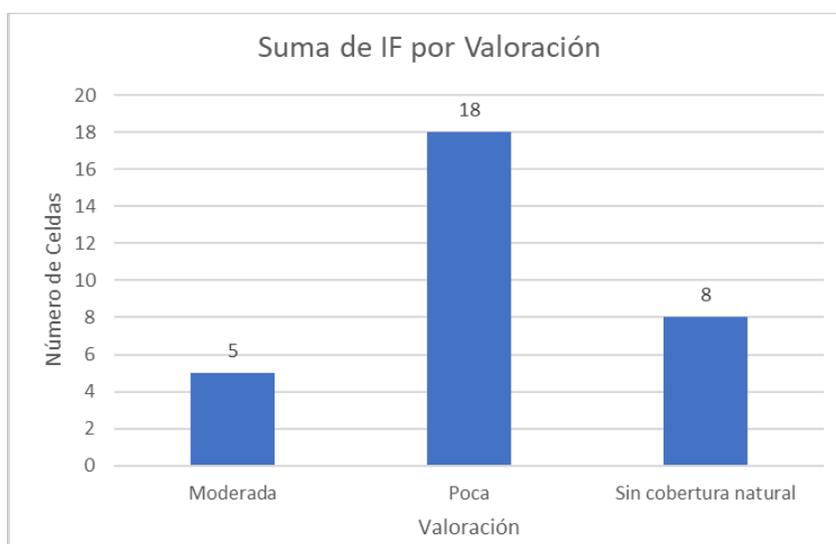
Tabla 2. Resultados del índice calculado en el POMCA Directos Río Magdalena – Brazo Morales – Río Boque – NSS.

| ID  | Celda  | ps | psc | cs | $(ps/cs*16)^*$<br>(ps/16) | IF         | Valoración            | Calificación |
|-----|--------|----|-----|----|---------------------------|------------|-----------------------|--------------|
| 2   | PX     | 64 | 64  | 1  | 4096                      | 0,015625   | Poca                  | 15           |
| 10  | WXII   | 63 | 63  | 1  | 3969                      | 0,01587302 | Poca                  | 15           |
| 13  | ZXII   | 43 | 35  | 4  | 462,25                    | 0,0757166  | Poca                  | 15           |
| 16  | CXIII  | 38 | 38  | 1  | 1444                      | 0,02631579 | Poca                  | 15           |
| 25  | JXV    | 61 | 61  | 1  | 3721                      | 0,01639344 | Poca                  | 15           |
| 32  | QXV    | 30 | 18  | 7  | 128,571429                | 0,14       | Moderada              | 10           |
| 42  | WXVI   | 19 | 9   | 3  | 120,333333                | 0,07479224 | Poca                  | 15           |
| 58  | FXVIII | 21 | 20  | 2  | 220,5                     | 0,09070295 | Poca                  | 15           |
| 69  | EXIX   | 33 | 30  | 3  | 363                       | 0,08264463 | Poca                  | 15           |
| 93  | OXX    | 0  | 0   | 0  | 0                         | 0          | Sin cobertura natural | 0            |
| 98  | TXX    | 0  | 0   | 0  | 0                         | 0          | Sin cobertura natural | 0            |
| 102 | XXX    | 32 | 18  | 3  | 341,333333                | 0,05273438 | Poca                  | 15           |
| 125 | QXXII  | 24 | 12  | 4  | 144                       | 0,08333333 | Poca                  | 15           |
| 142 | HXXIII | 47 | 47  | 1  | 2209                      | 0,0212766  | Poca                  | 15           |
| 146 | LXXIII | 0  | 0   | 0  | 0                         | 0          | Sin cobertura natural | 0            |
| 147 | YXXIII | 19 | 18  | 2  | 180,5                     | 0,09972299 | Poca                  | 15           |
| 154 | FXXIV  | 6  | 6   | 1  | 36                        | 0,16666667 | Moderada              | 10           |
| 155 | GXXIV  | 0  | 0   | 0  | 0                         | 0          | Sin cobertura natural | 0            |
| 170 | JXXV   | 18 | 11  | 2  | 162                       | 0,06790123 | Poca                  | 15           |
| 172 | LXXV   | 18 | 18  | 1  | 324                       | 0,05555556 | Poca                  | 15           |
| 173 | MXXV   | 14 | 13  | 2  | 98                        | 0,13265306 | Moderada              | 10           |
| 184 | XXXV   | 26 | 12  | 4  | 169                       | 0,07100592 | Poca                  | 15           |

| ID  | Celda   | ps | psc | cs | (ps/cs*16)*<br>(ps/16) | IF         | Valoración            | Calificación |
|-----|---------|----|-----|----|------------------------|------------|-----------------------|--------------|
| 193 | UXXVI   | 1  | 1   | 1  | 1                      | 1          | Moderada              | 10           |
| 223 | OXXVIII | 0  | 0   | 0  | 0                      | 0          | Sin cobertura natural | 0            |
| 228 | LXXIX   | 24 | 23  | 2  | 288                    | 0,07986111 | Poca                  | 15           |
| 271 | FXXIII  | 4  | 2   | 2  | 8                      | 0,25       | Moderada              | 10           |
| 277 | LXXXIII | 0  | 0   | 0  | 0                      | 0          | Sin cobertura natural | 0            |
| 281 | IXXXIV  | 30 | 30  | 1  | 900                    | 0,03333333 | Poca                  | 15           |
| 283 | KXXXIV  | 0  | 0   | 0  | 0                      | 0          | Sin cobertura natural | 0            |
| 295 | QXXXV   | 0  | 0   | 0  | 0                      | 0          | Sin cobertura natural | 0            |
| 304 | NXXXVI  | 39 | 35  | 3  | 507                    | 0,06903353 | Poca                  | 15           |

Fuente: Consorcio POMCA 2022.

Figura 9. Resultados del índice calculado en el POMCA Directos Río Magdalena – Brazo Morales – Río Boque – NSS.



Fuente: Modificado de Consorcio POMCA 2022.

En la Figura 8 se observa que en las 31 celdas muestreadas (10%) 6 dieron un resultado moderado, 12 sin cobertura natural y 13 con poca fragmentación. Por su parte, en la Figura 9 se observan esas mismas celdas, pero con los resultados calculados por el Consorcio POMCA, de cuales obtuvieron como resultado 5 moderado, 8 sin cobertura natural y 18 con poca fragmentación.

Se observa una variación en la clasificación denominada sin cobertura natural y con poca fragmentación, la primera paso del 25% al 39% en el área de la muestra, y la segunda del 42% al 58%; esto debido a que con la aplicación del filtro se eliminan muchos complejos sensibles aislados.

### **7.3.2 IndiFrag v2.1**

Para utilizar la herramienta IndiFrag se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Se utilizó la capa de coberturas corine land cover para la zona de estudio en formato vectorial; se agregó un nuevo atributo con la clasificación de celdillas sensibles y no sensibles según lo establecido en la metodología de Steenmans y Pinborg. Esta capa es la denominada Input\_Feature\_with\_Objects dentro de la herramienta, siendo el campo con la clase, el tipo de clasificación de celdillas.
- b) La de Capa de super objetos utilizada es la capa en formato vectorial con la clasificación de la grilla para el área de estudio.

Al utilizar la herramienta con solo datos vectoriales no fue posible hacer el análisis de acuerdo con la metodología de Steenmans y Pinborg. Se obtuvieron diferentes cálculos de las métricas de conectividad y fragmentación como: dimensión fractal (DFO), índice de forma (IFO), Ratio Medio Perímetro-Área (RMPA), entre otros (ver Figura 10). Estas métricas son la base para calcular diversos índices de fragmentación, pero, no son utilizadas en la metodología que exige la guía POMCA. Al ser una herramienta desarrollada por un grupo de investigadores fue solicitada directamente a los creadores Marta Sapena y Luis Angel Ruiz de la Universidad Politécnica de València asesoría sobre el manejo de la herramienta y si era posible realizar cálculos con capas de tipo raster, a lo cual respondieron que solo era posible realizarlo con capas en formato vectorial.

Figura 10. Métricas del paisaje calculadas con IndiFrag.

| Celdilla    | Clase   | Shape       | Le         | 1  | NAME   | ORIG   | FI | AreaO | PerimC | SO | AreaCl | PerimCl | NobCl | DC | TMC | DBC | DimB | RPA    | RMPA | IFO    | IFCI | DFO    |
|-------------|---|-------------|------------|----|--------|--------|----|-------|--------|----|--------|---------|-------|----|-----|-----|------|--------|------|--------|------|--------|
| No Sensible | Pastos limpios                                  | 224217.3801 | SuperObjec | 0  | 576558 | 4327.8 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0075 | 0    | 1.4249 | 0    | 1.0533 |
| No Sensible | Pastos arbolados                                | 224217.3801 | SuperObjec | 1  | 198668 | 2889.9 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0145 | 0    | 1.6201 | 0    | 1.0791 |
| No Sensible | Pastos limpios                                  | 224217.3801 | SuperObjec | 2  | 94624  | 1339.3 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0141 | 0    | 1.0885 | 0    | 1.0148 |
| Sensible    | Vegetación secundaria o en transición           | 224217.3801 | SuperObjec | 3  | 139175 | 13217. | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0094 | 0    | 2.8009 | 0    | 1.1456 |
| No Sensible | Mosaico de pastos con espacios naturales        | 224217.3801 | SuperObjec | 4  | 270045 | 3196.2 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0118 | 0    | 1.5376 | 0    | 1.0688 |
| Sensible    | Vegetación secundaria o en transición           | 224217.3801 | SuperObjec | 5  | 431223 | 3601.3 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0083 | 0    | 1.3710 | 0    | 1.0486 |
| No Sensible | Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturale | 224217.3801 | SuperObjec | 6  | 962419 | 6849.2 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0071 | 0    | 1.7454 | 0    | 1.0808 |
| No Sensible | Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturale | 224217.3801 | SuperObjec | 6  | 233362 | 22793. | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0097 | 0    | 3.7302 | 0    | 1.1795 |
| No Sensible | Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturale | 224217.3801 | SuperObjec | 6  | 1634.2 | 362.32 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.2217 | 0    | 2.2406 | 0    | 1.2180 |
| No Sensible | Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturale | 224217.3801 | SuperObjec | 6  | 30.688 | 93.987 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 3.0625 | 0    | 4.2414 | 0    | 1.8440 |
| No Sensible | Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturale | 224217.3801 | SuperObjec | 6  | 605.73 | 261.87 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.4323 | 0    | 2.6600 | 0    | 1.3054 |
| No Sensible | Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturale | 224217.3801 | SuperObjec | 6  | 1049   | 166.80 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.1590 | 0    | 1.2875 | 0    | 1.0726 |
| Sensible    | Vegetación secundaria o en transición           | 224217.3801 | SuperObjec | 7  | 573762 | 6841.1 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0119 | 0    | 2.2579 | 0    | 1.1228 |
| Sensible    | Vegetación secundaria o en transición           | 224217.3801 | SuperObjec | 8  | 334311 | 17755. | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0053 | 0    | 2.4276 | 0    | 1.1180 |
| No Sensible | Pastos limpios                                  | 224217.3801 | SuperObjec | 9  | 5140.3 | 310.86 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0604 | 0    | 1.0639 | 0    | 1.0189 |
| No Sensible | Pastos limpios                                  | 224217.3801 | SuperObjec | 10 | 96171. | 1336.4 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0155 | 0    | 1.1382 | 0    | 1.0227 |
| Sensible    | Bosque de galería y/o ripario                   | 224217.3801 | SuperObjec | 11 | 132984 | 36639. | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0275 | 0    | 7.9430 | 0    | 1.2939 |
| Sensible    | Bosque de galería y/o ripario                   | 224217.3801 | SuperObjec | 11 | 182047 | 7277.5 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0399 | 0    | 4.2641 | 0    | 1.2394 |
| Sensible    | Bosque de galería y/o ripario                   | 224217.3801 | SuperObjec | 12 | 19295  | 768.28 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0398 | 0    | 1.3827 | 0    | 1.0656 |
| Sensible    | Bosque de galería y/o ripario                   | 224217.3801 | SuperObjec | 13 | 143946 | 21898. | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0152 | 0    | 4.5630 | 0    | 1.2141 |
| No Sensible | Pastos limpios                                  | 224217.3801 | SuperObjec | 14 | 540236 | 4331.9 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0080 | 0    | 1.4734 | 0    | 1.0587 |
| Sensible    | Bosque denso                                    | 224217.3801 | SuperObjec | 15 | 506631 | 7006.2 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0138 | 0    | 2.4608 | 0    | 1.1371 |
| Sensible    | Vegetación secundaria o en transición           | 224217.3801 | SuperObjec | 16 | 963492 | 5916.3 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0061 | 0    | 1.5368 | 0    | 1.0595 |
| Sensible    | Vegetación secundaria o en transición           | 224217.3801 | SuperObjec | 17 | 205512 | 18310. | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0089 | 0    | 3.1931 | 0    | 1.1597 |
| No Sensible | Pastos enmalezados                              | 224217.3801 | SuperObjec | 18 | 56676. | 1835.9 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0324 | 0    | 1.9296 | 0    | 1.1201 |
| No Sensible | Pastos enmalezados                              | 224217.3801 | SuperObjec | 19 | 174086 | 2659.7 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0152 | 0    | 1.5936 | 0    | 1.0772 |
| No Sensible | Pastos enmalezados                              | 224217.3801 | SuperObjec | 20 | 203579 | 3008.9 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0147 | 0    | 1.6672 | 0    | 1.0836 |
| No Sensible | Cultivos permanentes arbóreos                   | 224217.3801 | SuperObjec | 21 | 516414 | 20753. | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0040 | 0    | 2.2831 | 0    | 1.1088 |
| Sensible    | Vegetación secundaria o en transición           | 224217.3801 | SuperObjec | 22 | 358616 | 14483. | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0040 | 0    | 1.9120 | 0    | 1.0858 |
| Sensible    | Vegetación secundaria o en transición           | 224217.3801 | SuperObjec | 23 | 103423 | 10446. | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0101 | 0    | 2.6379 | 0    | 1.1382 |
| Sensible    | Vegetación secundaria o en transición           | 224217.3801 | SuperObjec | 24 | 673567 | 4431.8 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0065 | 0    | 1.3500 | 0    | 1.0447 |
| No Sensible | Zonas de extracción minera                      | 224217.3801 | SuperObjec | 25 | 328870 | 21880. | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0066 | 0    | 3.0163 | 0    | 1.1471 |
| No Sensible | Cultivos permanentes arbóreos                   | 224217.3801 | SuperObjec | 26 | 211374 | 2203.6 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0104 | 0    | 1.1982 | 0    | 1.0295 |
| No Sensible | Cultivos permanentes arbóreos                   | 224217.3801 | SuperObjec | 26 | 0.0665 | 2.0436 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 30.718 | 0    | 1.9808 | 0    | 0.4955 |
| Sensible    | Bosque denso                                    | 224217.3801 | SuperObjec | 27 | 526000 | 4234.4 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0080 | 0    | 1.4596 | 0    | 1.0574 |
| No Sensible | Pastos enmalezados                              | 224217.3801 | SuperObjec | 28 | 807321 | 7315.7 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.0090 | 0    | 2.0355 | 0    | 1.1045 |
| No Sensible | Pastos limpios                                  | 224217.3801 | SuperObjec | 29 | 248.29 | 136.29 | 0  | 0     | 0      | 0  | 0      | 0       | 0     | 0  | 0   | 0   | 0    | 0.5489 | 0    | 2.1623 | 0    | 1.2797 |

Fuente: Autor, 2022.

Los resultados que arroja la herramienta no son tenidos en cuenta como un preprocesamiento a las capas que se utilizaran para calcular el índice de fragmentación según Steenmans y Pinborg.

### 7.3.3 Herramientas alternas

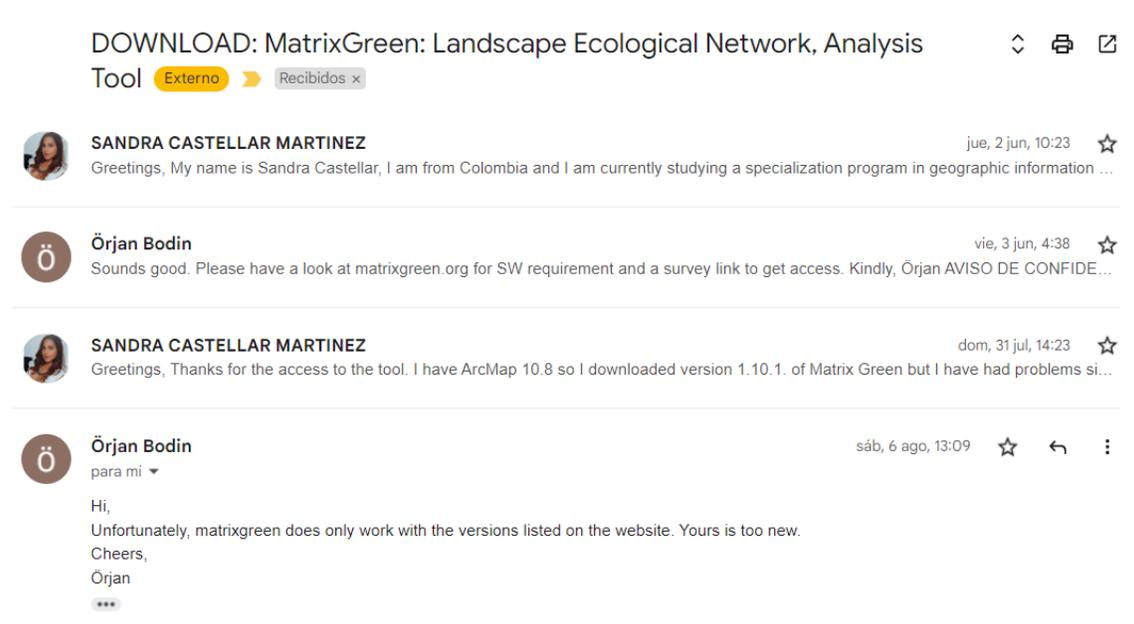
Los siguientes programas se pueden utilizar, pero presentan los siguientes inconvenientes

- Matrix Green Toolbox

La Matrix Green Toolbox permite realizar diferentes cálculos de fragmentación del paisaje como lo son: distancia de parches, análisis por componentes y análisis de centralidad de intermediación; permitiendo calcular diferentes grados de conectividad en las áreas naturales a estudiar. Al ser una herramienta desarrollada por un grupo de investigadores fue solicitada directamente a los creadores investigador Örjan Bodin y Andreas Zetterberg en el Royal Institute of Technology (KTH). Sin embargo, tiene la dificultad que la última versión del software solo se puede correr en la versión 10.3 de ArcGIS, y actualmente muchas personas trabajan en versiones superiores o en ArcGIS pro. Se considera entonces, que las personas que desean utilizarla tengan en cuenta esta limitante. En la Figura 11 se observan los correos enviados a los investigadores y

su respuesta donde indican que en versiones más actualizadas de ArcGIS no funcionan, es por esto que no se tuvo en cuenta para realizar el análisis en el área de estudio seleccionada.

Figura 11. Comunicación con los investigadores de la Matrix Green Toolbox.



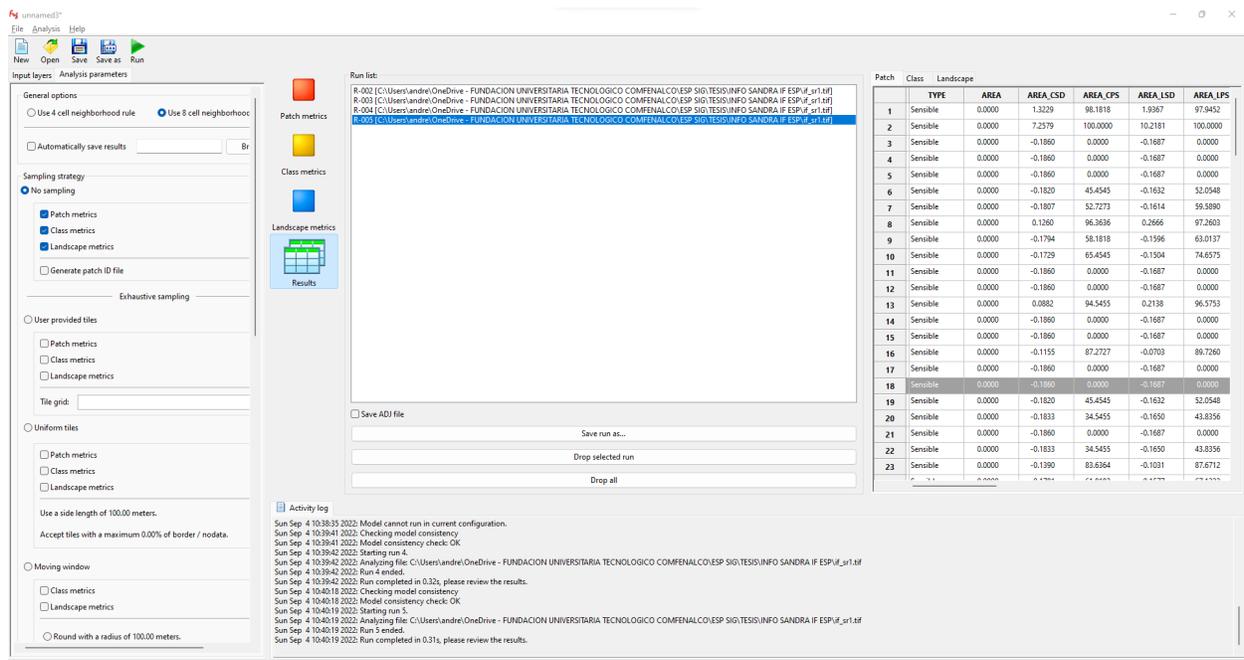
Fuente: Autor, 2022.

#### ▪ Fragstat

La herramienta permite calcular diferentes métricas de conectividad y fragmentación del paisaje como Dimensión fractal del área perimetral, Distribución del índice fractal, Distribución del índice de forma, Relación perímetro-área, entre otras. Al igual que con la herramienta Indifrag v2.1, estos cálculos son la base para diversos índices de fragmentación, pero, no son utilizadas en la metodología que exige la guía POMCA.

Los análisis que permite hacer la herramienta van desde nivel de parche, clases o paisaje: análisis de área y perímetro de parches, área total del paisaje, análisis de dispersión e Interdispersión de parches, entre otros.

Figura 12. Métricas del paisaje calculadas con Fragstats



Fuente: Autor, 2022

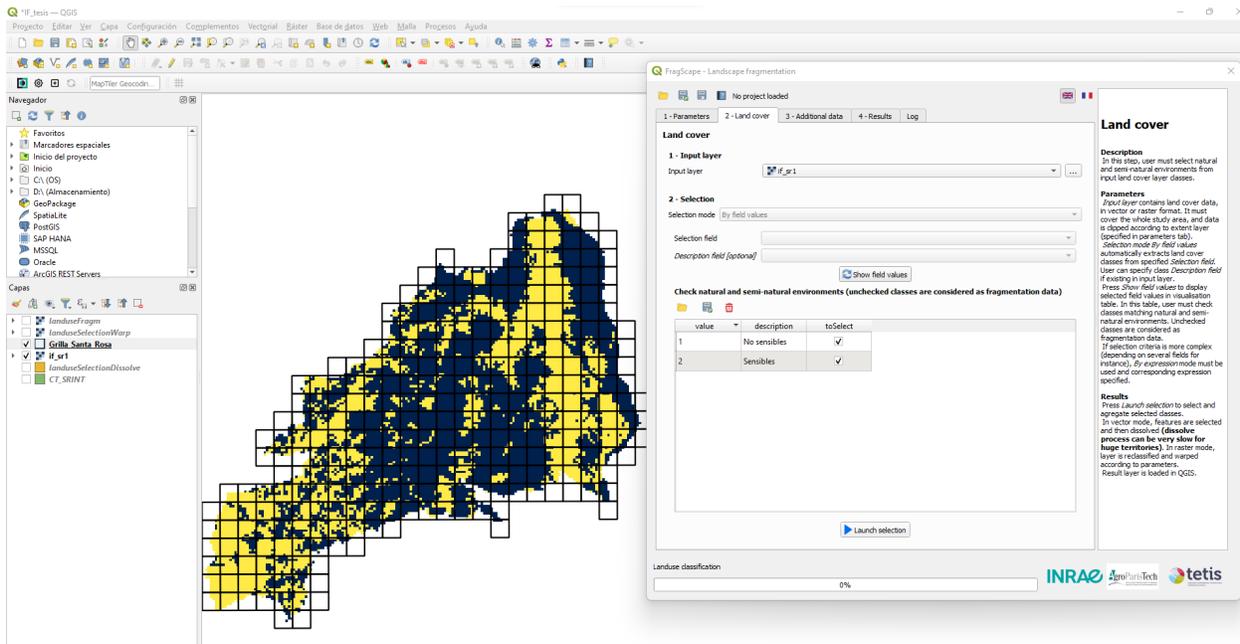
- **Fragstats**

Fragstats es una herramienta que tiene propiedades muy parecidas a Fragstat; se podría decir que es un plugin del entorno QGIS basado en esta última. Al igual que Fragstat, permite realizar análisis de fragmentación con capas de coberturas en formato ráster pero esta incluye a diferencia de Fragstat, la opción de realizar el análisis de fragmentación con capas de formato vectorial; en ambos casos se puede complementar el análisis introduciendo una variable que contenga los elementos potenciales de generar fragmentación como infraestructura vial o cualquier otro elemento antrópico.

En la Figura 13 se muestran los elementos utilizados para realizar el análisis con Fragstats para la zona de estudio definida. Para el caso del cálculo del índice de fragmentación según la metodología de Steenmans y Pinborg, con esta herramienta no es posible calcular los celdillas de acuerdo a la grilla utilizada como input. Al igual que Indifrag y Fragstat no es posible determinar

el índice de fragmentación según Steenmans y Pinborg pero, pueden ser utilizadas para calcular diferentes índices de fragmentación de acuerdo a otros autores.

Figura 13. Plugin Frascap en el entorno QGIS



Fuente: Autor, 2022

- ArcPy

ArcPy proporciona acceso a las herramientas de geoprocésamiento, así como a las funciones adicionales, las clases y los módulos que le permiten crear flujos de trabajo simples o complejos de manera rápida y sencilla (ESRI, 2022). Este complemento dentro del entorno de ArcGIS permite al usuario realizar múltiples análisis de manera automatizada, pero para esto es necesario que el usuario tenga cierto nivel de conocimiento en temas de programación con Python.

### 7.3.4 Comparación de métodos para el cálculo del índice de fragmentación

A continuación, se resumen las herramientas utilizadas en la presente investigación con sus respectivos resultados.

Tabla 3. Métodos para el cálculo del índice de fragmentación

| Herramienta          | Tiempo de procesamiento  | Ventajas  | Desventajas   |
|----------------------|--|---|---|
| Matrix Green Toolbox | No se pudo utilizar la herramienta (versión discontinuada)   | No se pudo utilizar la herramienta (versión discontinuada)  | La última versión del software solo se puede correr en la versión 10.3 de ArcGIS, y actualmente muchas personas trabajan en versiones superiores o en ArcGIS pro. |
| Peppsalt             | El tiempo de procesamiento del filtro es muy relativo al tamaño de la zona de estudio y de la capacidad del hardware con el que se cuenta. Para este estudio el tiempo de procesamiento para una zona de estudio de 100.448ha fue de menos de un minuto. | Se observa una variación en la clasificación denominada sin cobertura natural y con poca fragmentación, la primera paso del 25% al 39% en el área de la muestra, y la segunda del 42% al 58%.<br><br>Con la aplicación del filtro se eliminan muchos complejos sensibles aislado, lo que podría reducir los tiempos en el cálculo del índice. | La herramienta ILWIS es muy poco conocida en el ámbito de la consultoría, es mas utilizado a nivel académico.   |
| Indifrag             | No se pudo utilizar la herramienta   | El software solo admite datos de entrada en formato vectorial.  | Al utilizar la herramienta con solo datos vectoriales no fue posible hacer el análisis de acuerdo con la metodología de Steenmans y Pinborg.                      |
| Fragstat             | No se pudo utilizar la herramienta   | El software solo admite datos de entrada en formato raster.   | Los cálculos que realiza la herramienta no son los utilizados en la metodología de Steenmans y Pinborg.   |
| Frascape             | No se pudo utilizar la herramienta   | El software admite datos de entrada en formato raster y vectorial, pero no permite el cálculo a nivel de pixel de acuerdo a la metodología de Steenmans y Pinborg.  | Los cálculos que realiza la herramienta no son los utilizados en la metodología de Steenmans y Pinborg.   |
| ArcPy                | No se pudo utilizar la herramienta   | No se pudo utilizar la herramienta  | Requiere conocimientos previos en programación en el entorno de Python.   |

## 8. Conclusiones

Las herramientas utilizadas para calcular el índice de fragmentación desarrollado por Steenmans y Pinborg fueron: Matrix Green Toolbox e IndiFrag, son herramientas que están diseñadas para trabajar en el entorno de ArcGIS, el cual es un sistema muy ampliamente conocido y que permite trabajar con capas en formato vectorial y realizar diferentes métricas del paisaje y cálculos de fragmentación por tipo de clases, parches o paisajes; Fragscape es una herramienta muy completa que permite hacer análisis en capas de formato raster y vectorial, es la única herramienta de las analizadas que permite la inclusión de los dos tipos de formato para un mismo análisis. Por su parte Fragstat permite el cálculo de métricas del paisaje con capas de cobertura en formato raster, es un software libre desarrollado por investigadores del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Por último, otra de las herramientas analizadas fue el filtro binario PEPPSALT del Software libre ILWIS el cual permitió eliminar aquellas celdas de áreas naturales que se encuentran aisladas, es decir que no se encuentran conectados con otro pixel de área natural.

De la evaluación de las herramientas disponibles se encontró que el filtro binario PEPPSALT puede ser utilizado como un preprocesamiento al momento de calcular el índice de fragmentación desarrollado por Steenmans y Pinborg, ya que con la aplicación del filtro se eliminan muchos complejos sensibles aislados lo que podría reducir tiempos al momento de calcular el índice; no se puede estimar en cuanto se disminuirían los cálculos luego de la aplicación del filtro ya que el tiempo de procesamiento del filtro es muy relativo al tamaño de la zona de estudio y de la capacidad del hardware con el que se cuente.

De la comparación de los métodos para el cálculo se encontró que no existe una herramienta que pueda calcular el índice de fragmentación desarrollado por Steenmans y Pinborg; la mayoría de las herramientas analizadas permite el cálculo de métricas del paisaje por clases, parches o coberturas, y por un solo tipo de información de entrada, ya sea en formato raster o formato vector, y la única herramienta evaluada que incluye el análisis con los dos formatos no permite realizar los cálculos a nivel de píxeles como lo pide la metodología.

Sobre la metodología propuesta no se pudieron utilizar dos herramientas: Matrix Green toolbox y ArcPy. La primera herramienta solo se encuentra en su última versión para ser utilizada con la versión 10.3 de ArcGIS o anteriores, lo cual es una limitante ya que actualmente muchas personas trabajan en versiones superiores o en ArcGIS pro. La segunda por su parte requiere conocimientos previos en programación bajo el ambiente de Python, lo cual es algo que se debe considerar al momento de utilizarla.

Mediante este trabajo se pudo establecer que el filtro PEPPSALT puede ser utilizado como preprocesamiento a la hora de calcular el índice mediante la metodología que exige la guía POMCA, de esta manera se podrían disminuir la cantidad de horas empleadas por los profesionales, y se lograría un impacto positivo en el rendimiento y tiempos de entrega de los proyectos.

De acuerdo al trabajo realizado se logra evidenciar la necesidad de automatizar el cálculo del índice de fragmentación desarrollado por Steenmans y Pinborg apoyándose con herramientas como ArcPy y Machine Learning, las cuales han sido estudiadas en muchas investigaciones para ser utilizadas con los sistemas de información geográfica y la generación de modelos de información cartográfica útil para la toma de decisiones en distintas temáticas, desde la predicción

de inundaciones hasta el modelamiento de la fragmentación de los usos del suelo en cuencas hidrográficas.

Por último, con los resultados obtenidos no se puede determinar de manera general en cuanto se disminuirán los tiempos de procesamiento de la información con las herramientas utilizadas, ya que dependerá del tamaño de la zona de estudio deseada y de la clasificación de zonas sensibles y no sensibles que tenga; es por esto por lo que se concluye que ninguna de las herramientas utilizadas permite al usuario aproximarse a un resultado esperado del índice.

## 9. Recomendaciones

Se hace necesario proponer el desarrollo de una herramienta que automatice el cálculo del índice, limitando la intervención del usuario más allá de la introducción de los datos de entrada en la aplicación, de esta manera se podrían disminuir la cantidad de horas empleadas por los profesionales, se lograría un impacto en los procesos de las empresas generando un mayor rendimiento en los tiempos de entrega de los proyectos y generaría menores costos por la contratación de técnicos auxiliares.

El filtro PEPPSALT dio buenos resultados al disminuir el número de complejos sensibles aislados, pero el software ILWIS es muy poco conocido o fácil de trabajar por lo que estos mismos resultados se pueden obtener utilizando la herramienta “Majority filter” que se encuentra en la toolbox de Spatial Analyst de ArcGIS o la herramienta “Majority filter” de la caja de herramientas SAGA de QGIS.

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación en la cual se logra identificar que no existe actualmente una herramienta que permita calcular de manera automática el índice de fragmentación desarrollado por Steenmans y Pinborg, el desarrollo de una herramienta que realice los análisis por medio de inteligencia artificial o machine learning sería lo ideal, ya que se puede enseñar a la “maquina” cuales pixeles debe contar y cuales descartar de acuerdo a la clasificación que se haga sobre la zona de estudio propuesta.

## 10. Referencias

- Cerrato, L., Maldonado, P., & Ñañez, A. (2017). *Zonificación de áreas prioritarias para la conservación y recuperación ecosistémica de la cuenca baja del río ranchería mediante sistemas de información geográfica en el departamento de la guajira*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José Caldas.
- Chen, X., & Chen, W. (2021). GIS-based landslide susceptibility assessment using optimized hybrid machine learning methods. *Catena, Elsevier*.
- Corredor, S. (2019). *Revisión y comparación del índice de fragmentación de coberturas naturales para cuatro cuencas hidrográficas en estudio*. Bogotá.
- ESRI. (28 de 08 de 2022). *¿Qué es ArcPy?* Obtenido de ArcGIS Desktop: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/analyze/arcpy/what-is-arcpy-.htm#:~:text=ArcPy%20es%20un%20paquete%20de,automatizaci%C3%B3n%20de%20mapas%20con%20Python>.
- ESRI. (31 de 08 de 2022). *ArcGIS Resources* . Obtenido de Introducción a ArcGIS: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Hysa, A., & Türer Başkaya, F. (2017). Landscape Fragmentation Assessment Utilizing the Matrix Green Toolbox and CORINE Land Cover Data. *JoDLA- Journal of Digital Landscape Architecture*, 54-62.
- ITC, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. (02 de 09 de 2022). *ILWIS*. Obtenido de Main Page: [http://ilwis.itc.utwente.nl/wiki/index.php/Main\\_Page](http://ilwis.itc.utwente.nl/wiki/index.php/Main_Page)

- McGarigal, K., Cushman, S., & Ene, E. (2012). *FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps*. Obtenido de <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*.
- Ponce Villacís, C. (2008). *Análisis de cambio de cobertura vegetal y Fragmentación en el corredor de conservación Comunitaria el ángel - bosque golondrinas, Provincia del Carchi*. Sangolqui : ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO.
- QGIS. (31 de 08 de 2022). *Acerca de QGIS*. Obtenido de QGIS - El SIG Líder de Código Abierto para Escritorio: <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>
- Sangiorgi, C., & Irali, F. (2011). *An Infrastructural Fragmentation Index for assessing landscape fragmentation due to Transportation Infrastructures* . Bologna: University of Bologna.
- Sapena Moll, M., & Ruiz Fernández, L. (2016). *IndiFrag v2.1: An Object-based Fragmentation Analysis Software Tool*. Grupo de Cartografía, GeoAmbiental y Teledetección del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universitat Politècnica de València, España.
- Singh, S. K., Pandey, A. C., & Singh, D. (2014). Land Use Fragmentation Analysis Using Remote Sensing and Fragstats. *Society of Earth Scientists Series*, 151 - 176.
- Singh, S., Sudhakar Reddy, C., Pasha, S. V., Dutta, K., Saranya, K., & Satish, K. (2016). Modeling the spatial dynamics of deforestation and fragmentation using Multi-Layer Perceptron neural network and landscape fragmentation tool. *Ecological Engineering*, 543-551.

- Steenmans, C., & Pinborg, U. (2000). Anthropogenic fragmentation of potential semi-natural and natural areas. En E. J. European Comission (DG AGRI, *From Land Cover to Landscape Diversity in the European Union, Office for Official Publications of the EC.*
- Talukdar, S., Uddin Eibek, K., Akhter, S., Reza, A., Ziaul, S., Mallick, J., & Md. Islam, T. (2021). Modeling fragmentation probability of land-use and land-cover using the bagging, random forest and random subspace in the Teesta River Basin, Bangladesh. *Ecological Indicators, ELSEVIER.*
- The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). (1998). *ILWIS 2.2 Guide*. Enschede: ILWIS 2.2 for Windows.
- Tituaña Albán, O. D. (2015). *Análisis de fragmentación de hábitats para la creación de corredores de conservación entre áreas protegidas utilizando herramientas SIG*. Quito: Universidad San Francisco de Quito USFQ.
- Triviño Pérez, A., Vicedo Maestre, M., & Soler Capdepón, G. (2007). *Análisis de sensibilidad a factores de escala y propuesta de normalización del índice de fragmentación de hábitats empleado por la agencia europea de medio ambiente*. Alicante: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica.
- Velasco Dorado, L. A. (2018). *Selección de instrumentos de política para la protección de ecosistemas estratégicos en la provisión de servicios ecosistémicos*. Medellín : Universidad Nacional de Colombia.
- Zetterberg, A., & Bodin, Ö. (2012). *MatrixGreen: Landscape Ecological Network Analysis Tool – User manual*.

