

ENFOQUE ESPACIAL PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD DE ÁREAS DE CULTIVO. CASO DE ESTUDIO: TUNJA, BOYACÁ

*Paula Andrea Cardona Velásquez <pcardonav@unal.edu.co> - Ingeniera Catastral y Geodesta
Jorge Esteban Rojas Toro <jorojasto@unal.edu.co> - Ingeniero Ambiental
Paola Andrea Ospina Sanchez <pospinas@unal.edu.co> - Ingeniera Agronómica*

Resumen

La evaluación de la aptitud agrícola de la zona rural de Tunja, Boyacá, es fundamental para promover un desarrollo agrícola sostenible y eficiente. Este estudio integra diversas fuentes de datos espaciales y metodologías de análisis geoespacial mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el lenguaje de programación Python. Se identificaron las áreas libres de restricciones, limitantes y/o condicionantes para la producción agrícola, empleando datos biofísicos, socioeconómicos y ambientales. El resultado final es un mapa que delimita las zonas viables para actividades productivas, contribuyendo así a la planificación territorial y al uso eficiente del suelo rural en el municipio.

Palabras clave: Python, SIG, análisis espacial, desarrollo sostenible.

Abstract

The evaluation of agricultural suitability in the rural area of Tunja, Boyacá, is essential to promote sustainable and efficient agricultural development. This study integrates various spatial data sources and geospatial analysis methodologies using Geographic Information Systems (GIS) and the Python programming language. Areas free of restrictions, limitations, and/or conditions for agricultural production were identified using biophysical, socioeconomic, and environmental data. The final result is a map delineating areas feasible for productive activities, thus contributing to territorial planning and efficient the rural land use in the municipality.

Keywords: Python, GIS, spatial analysis, sustainable development.

1. INTRODUCCIÓN

La planificación y gestión sostenible de los territorios rurales es fundamental para garantizar la seguridad alimentaria, promover el desarrollo agrícola y enfrentar los desafíos del cambio climático. Es en este contexto que la evaluación de tierras toma un papel relevante en la planificación de su uso y propone como objetivos sistemas de producción que sean apropiados a su contexto, es decir, ambientalmente aceptables, socialmente viables y sostenibles en el mediano y largo plazo. (Corrales et al., 2018)

Para la evaluación de tierras se han desarrollado diversas metodologías permitiendo identificar áreas con potencialidades y limitaciones específicas para actividades agropecuarias; las cuales, hacen uso de la integración de criterios biofísicos, socioeconómicos y ambientales. Uno de los primeros modelos multicriterio de evaluación de tierras, fue propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 1997 el cual divide la superficie terrestre en unidades más pequeñas con características similares en términos de aptitud de tierras, producción potencial e impacto ambiental. (Food and Agriculture Organization - FAO, 1997).

A nivel nacional, el sector agro tiene una amplia historia, quizás de los mayores esfuerzos por modernizar el agro en Colombia se dio en el año de 1962 con la creación del Instituto Colombiano Agropecuario – ICA. En el 2013, en cabeza de la Unidad de Planificación Rural - UPRA, en colaboración con la Universidad Nacional de Colombia, propusieron una metodología a escala 1:100.000 que incluye criterios biofísicos, sociales, económicos y ambientales validando dicha metodología en municipios de los departamentos del Cauca y Tolima, mediante talleres de socialización y ajustes basados en los resultados obtenidos. (Agropecuaria, 2013). Ya en el 2019, la UPRA presentó una segunda versión de esta metodología con base en la información recogida durante el desarrollo del primer ejercicio. (Corrales et al., 2018)

El uso e implementación de estos modelos de evaluación territorial, involucra el manejo e interpretación de información espacial, convirtiendo a los Sistemas de Información Geográfica - SIG en un requisito fundamental para la evaluación de tierras. (Corrales et al., 2018).

En el uso de los SIG la capacidad de procesamiento y la disponibilidad de datos ha aumentado, de tal manera que el conjunto de habilidades depende cada vez más de la ciencia de datos y la programación. (Bowlick et al., 2020). Autores como Bowling (2020) han adoptado el término GIScientist, expresando esa inmersión del mundo de la ciencia de datos sobre los SIG que hoy día brinda la capacidad de mediante grandes capacidad computacionales y de uso de datos espaciales, crear visualizaciones y simulaciones que permitan representar conceptos y modelos cada vez más complejos y fiables a la hora de realizar análisis espaciales de algún fenómeno. (Bowlick et al., 2020)

Python es uno de los lenguajes más utilizados en el análisis espacial debido a su popularidad y amplia variedad de librerías especializadas (Etherington, 2011). Entre ellas, GeoPandas destaca como una herramienta de código abierto basada en pandas, que facilita el manejo y análisis de datos espaciales (GeoPandas 1.0.1, 2013). Autores como Conrad et al., (2015); Dixon, (2015); Etherington, (2011) y Muenchow et al., (2019); han explicado ampliamente el funcionamiento e integración de librerías y paquetes de Python en el análisis espacial y generación de datos espaciales.

La integración de herramientas de programación a un análisis para la zonificación y evaluación de tierras es de gran utilidad en un contexto donde el país se encuentra en un proceso histórico de transformación social del conflicto armado interno, pues la restitución de tierras fértiles a víctimas del conflicto es muy relevante para el fin del conflicto armado en Colombia. (Wiig & García-Reyes, 2020). Una herramienta de este tipo permitiría integrar y procesar grandes volúmenes de datos espaciales, como información climática, edáfica, topográfica, etc., para evaluar la aptitud agrícola de manera precisa y rápida; por otra parte, la implementación de procesos automatizados en Python optimiza el desarrollo de procesos complejos. El presente proyecto busca implementar un modelo de análisis espacial de código abierto en Python para evaluar las zonas rurales sin restricciones, limitantes y/o condicionantes de la zona rural del municipio de Tunja - Boyacá, utilizando operaciones espaciales con datos del documento de ordenamiento territorial, biofísicos, y ambientales procesados en un entorno SIG. El código será documentado en detalle.

2. METODOLOGÍA

Se realizó un análisis para identificar las zonas sin restricciones, limitantes y/o condicionantes en el área rural del municipio de Tunja, ubicado en el departamento de Boyacá; con el fin de analizar y delimitar aquellas zonas rurales libres de impedimentos para usos agrícolas. Se integraron y procesaron diversas fuentes de datos espaciales en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando el lenguaje de programación Python. Ver **figura 1**.

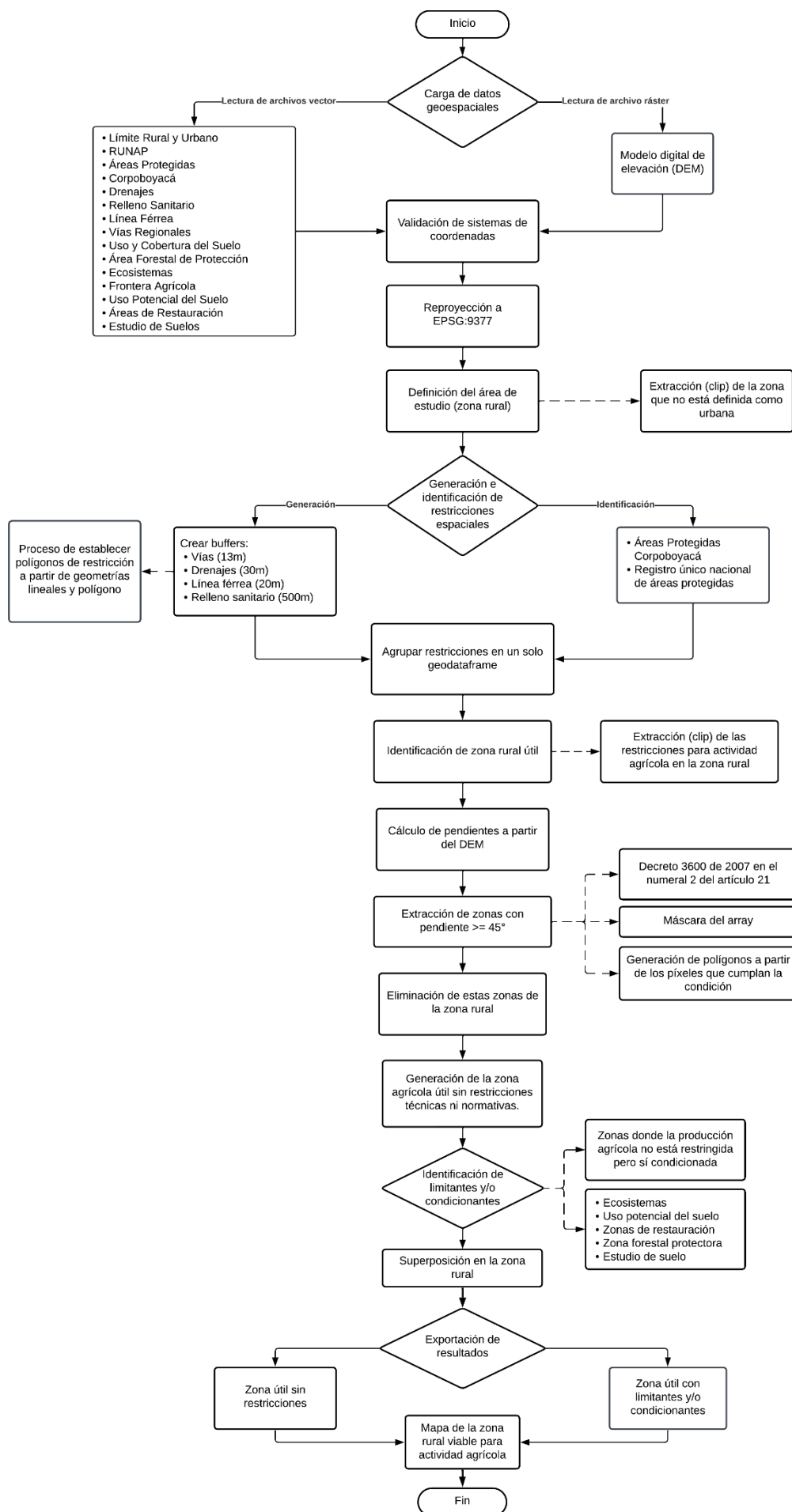


Figura 1. Diagrama de Flujo Metodología

2.1. Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la zona rural del municipio de Tunja, Boyacá, Colombia (*figura 1*). Para definir esta área, se utilizó el límite municipal extraído de los datos abiertos dispuestos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. Posteriormente, se eliminó el área urbana delimitada por el documento de Ordenamiento Territorial disponible en la página de la Alcaldía Municipal de Tunja, estableciendo así el área rural.

Tunja, la capital del departamento de Boyacá, se encuentra ubicada en la Provincia Centro, sobre la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, a unos 130 kilómetros al noreste de Bogotá. Este municipio tiene una extensión total de 121,4 km², de los cuales 19,8 km² corresponden al área urbana y 101,7 km² al área rural. La cabecera municipal está situada a una altitud de 2.782 m.s.n.m. y cuenta con un clima frío moderado, con una temperatura promedio de 13°C.

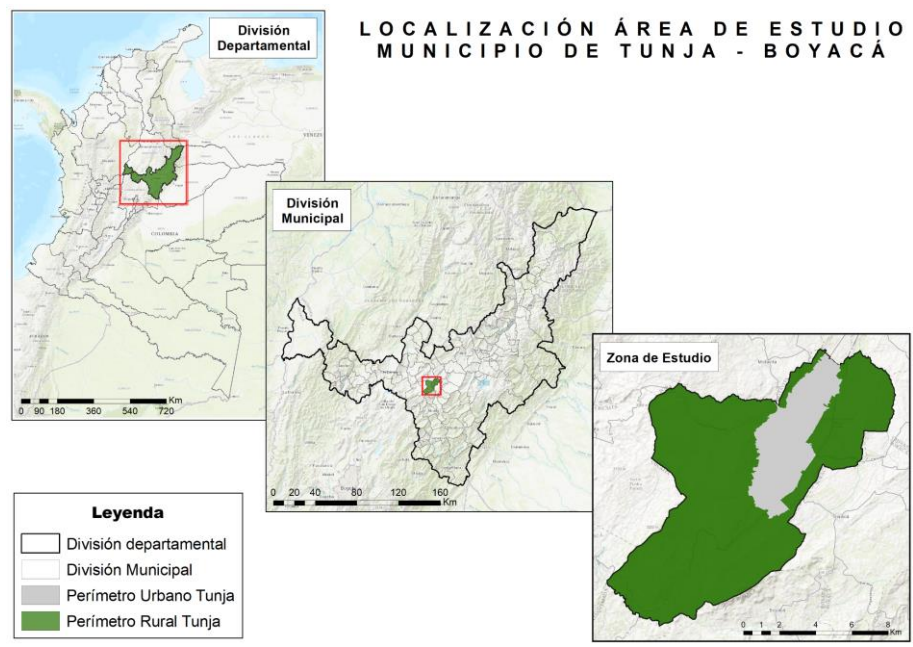


Figura 2. Área de Estudio. Tuja, Boyacá.

2.2. Datos Utilizados

Se emplearon diversas fuentes de información geoespacial, tanto vectoriales como ráster. Ver *tabla 1*. La información recopilada se clasificó en dos categorías principales: restricciones y limitantes y/o condicionantes, como se observa a continuación.

Tabla 1. Datos objeto de análisis y procesamiento

No.	Dato	Fuente	Clasificación
1	Límite Rural - Tunja Boyacá	Colombia en Mapas - IGAC	Límite área de estudio
2	Límite Urbano Tunja - Boyacá	POT Tunja, Boyacá	Restricción
3	Registro Único Nacional de Áreas Protegidas - RUNAP	Parques Nacionales Naturales de Colombia - PNN	Restricción
4	Áreas Protegidas Corpoboyacá	POT Tunja, Boyacá - Corpoboyacá	Restricción
5	Drenajes	POT Tunja, Boyacá	Restricción

No.	Dato	Fuente	Clasificación
6	Relleno Sanitario Parque Ambiental Pírgua	POT Tunja, Boyacá	Restricción
7	Línea Férrea	POT Tunja, Boyacá	Restricción
8	Vías Regionales	POT Tunja, Boyacá	Restricción
9	Uso y Cobertura del Suelo	POT Tunja, Boyacá	Restricción
10	Área Forestal de Protección	POT Tunja, Boyacá	Restricción
11	Modelo Digital de Elevación - DEM	Colombia en Mapas - IGAC	Restricción
12	Ecosistemas	IDEAM	Limitante y/o Condicionante
13	Frontera Agrícola	Unidad de Planificación Rural Agropecuaria - UPRA	Limitante y/o Condicionante
14	Uso Potencial del Suelo	POT Tunja, Boyacá	Limitante y/o Condicionante
15	Áreas de Restauración	POT Tunja, Boyacá	Limitante y/o Condicionante
16	Estudio de Suelos (Boyacá)	Colombia en Mapas - IGAC	Limitante y/o Condicionante

2.3. Carga de Datos Geoespaciales

El proceso inicia con la recopilación y carga de los datos espaciales en formato vectorial y ráster. La información utilizada incluye límites territoriales, áreas protegidas, drenajes, infraestructura vial y datos de cobertura del suelo. Para el procesamiento, se emplearon los datos de la **tabla 1**, utilizando las librerías **geopandas**, **rasterio** y **pandas** en Python.

2.4. Validación y Reproyección de los Datos

Antes de realizar cualquier análisis espacial, se validó que todas las capas compartieran el mismo sistema de coordenadas. Se verificó el sistema de referencia espacial (CRS) de cada capa y se realizó la reproyección a EPSG:9377 (Origen Único Nacional de Colombia) para asegurar una correcta integración en el análisis.

2.5. Delimitación del Polígono del Área de Estudio

Para establecer el área de estudio, se realizó la diferenciación entre zona urbana y zona rural. Ver **figura 3**.

- Se extrajo el límite municipal del IGAC y se superpuso con la capa de límite urbano del documento de Ordenamiento Territorial de Tunja.
- Se utilizó una operación de diferencia espacial (**overlay(difference)**) para obtener la zona rural excluyendo el área urbana.

2.6. Identificación y Generación de Restricciones

En esta etapa se diferenciaron dos tipos de restricciones:

- **Generadas:** Se crearon mediante procesos espaciales, como buffers.

- **Identificadas:** Se extrajeron de capas existentes.

2.6.1. Generación de restricciones espaciales

Se establecieron polígonos de restricción a partir de geometrías lineales y poligonales, generando buffers para representar zonas de exclusión alrededor de ciertos elementos:

- **Vías:** Se generó un buffer de **13 metros** para considerar el área de influencia de la infraestructura vial.
- **Drenajes:** Se creó un buffer de **30 metros** basado en la normativa ambiental vigente.
- **Línea férrea:** Se estableció un buffer de **20 metros** para restringir áreas cercanas a la infraestructura ferroviaria.
- **Relleno sanitario:** Se aplicó un buffer de **500 metros** para evitar la proximidad a esta infraestructura.

2.6.2. Identificación de restricciones espaciales existentes

Se integraron capas con información de restricciones ambientales y territoriales predefinidas, tales como:

- Áreas protegidas de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá - Corpoboyacá.
- Registro Nacional de Áreas Protegidas - RUNAP.

Todas las restricciones fueron combinadas en un único GeoDataFrame mediante la operación **dissolve()** para facilitar su manejo y análisis. Ver **figura 4**.

2.7. Identificación de Zona Rural Útil

Se realizó la identificación de la zona rural viable (preliminar) eliminando de la zona rural las áreas restringidas. Ver **figuras 5 y 6**:

- Se aplicó una operación espacial de diferencia (**overlay(difference)**) entre la capa de zona rural y el conjunto de restricciones.
- Se generó un mapa preliminar con las áreas sin restricciones.

2.8. Cálculo de pendientes y eliminación de zonas con fuerte inclinación

Para evaluar la aptitud del terreno, se calculó la pendiente utilizando el **Modelo Digital de Elevación (DEM)** – ver **figura 5**:

- Se aplicó un análisis de gradiente (**numpy.gradient()**) para obtener las pendientes del terreno en grados.
- Se generó una máscara para identificar áreas con pendientes $\geq 45^\circ$.
- Se extrajeron las zonas afectadas y se convirtieron en polígonos mediante **rasterio.features.shapes()**.
- Se eliminaron estas zonas del área de estudio con una nueva operación de diferencia espacial.

Este criterio se aplicó conforme a la normativa vigente (Decreto 3600 de 2007, numeral 2 del artículo 21), que establece restricciones para terrenos con alta pendiente.

2.9. Generación de la zona agrícola útil sin restricciones

Se definió la zona agrícola útil sin restricciones técnicas ni normativas, eliminando del área rural:

- Restricciones espaciales (vías, drenajes, relleno sanitario, etc.).
- Áreas con pendientes $\geq 45^\circ$.

Nota: Los siguientes numerales y capítulos serán desarrollados en su totalidad para la entrega final del proyecto.

2.10. Identificación de limitantes y/o condicionantes

Se identificaron zonas donde la producción agrícola no está restringida pero sí condicionada. Estas incluyen:

- Ecosistemas.
- Uso potencial del suelo.
- Áreas de restauración.
- Zona forestal protectora.
- Estudio de suelos.

Se realizó una superposición espacial de estos elementos con la zona agrícola útil para clasificarlas correctamente.

2.11. Exportación de resultados y generación del mapa final

Los resultados se exportaron en formato shapefile (**.shp**) y raster (**.tif**), asegurando la replicabilidad del análisis.

Se generó un producto cartográfico final con:

1. Zonas útiles sin restricciones.
2. Zonas útiles con limitantes y/o condicionantes.

Para la visualización de los resultados, se utilizaron **matplotlib**, **geopandas** y **folium**, permitiendo la representación estática e interactiva del mapa final.

3. RESULTADOS PARCIALES

Se obtuvo un mapa detallado del área rural de Tunja, que identifique las áreas viables para la producción agrícola, libres de restricciones, limitantes y/o condicionantes, clasificadas en usos productivos, forestales o de conservación. Este mapa permitirá una mejor planificación del uso del suelo, promoviendo un desarrollo agrícola sostenible y eficiente. Además, se busca demostrar la eficacia del uso de herramientas de código abierto como Python y librerías especializadas en el análisis geoespacial, facilitando la replicabilidad y escalabilidad del modelo a otras regiones.

Código en desarrollo...

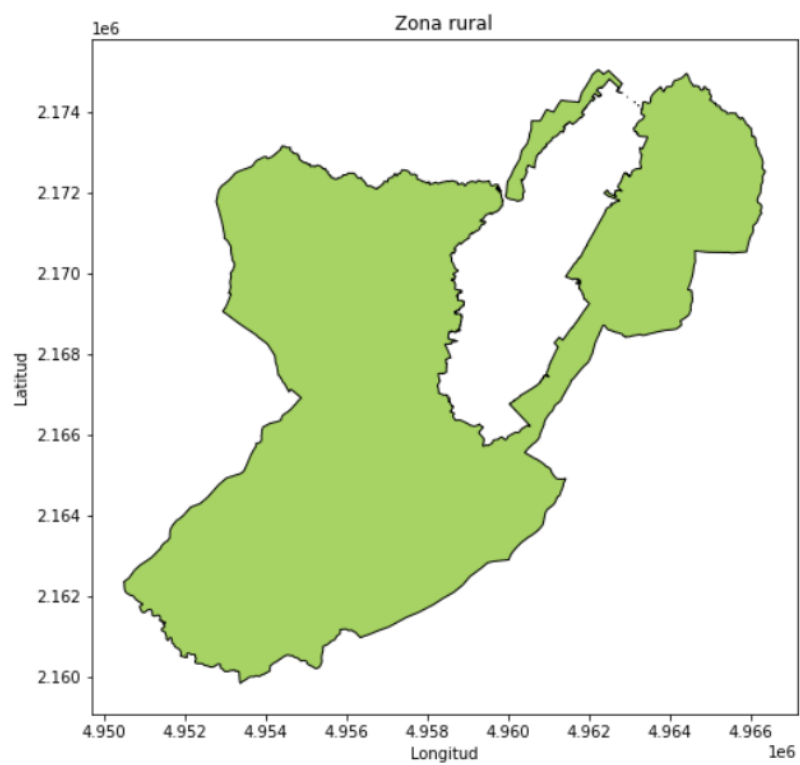


Figura 3. Polígono Área Rural

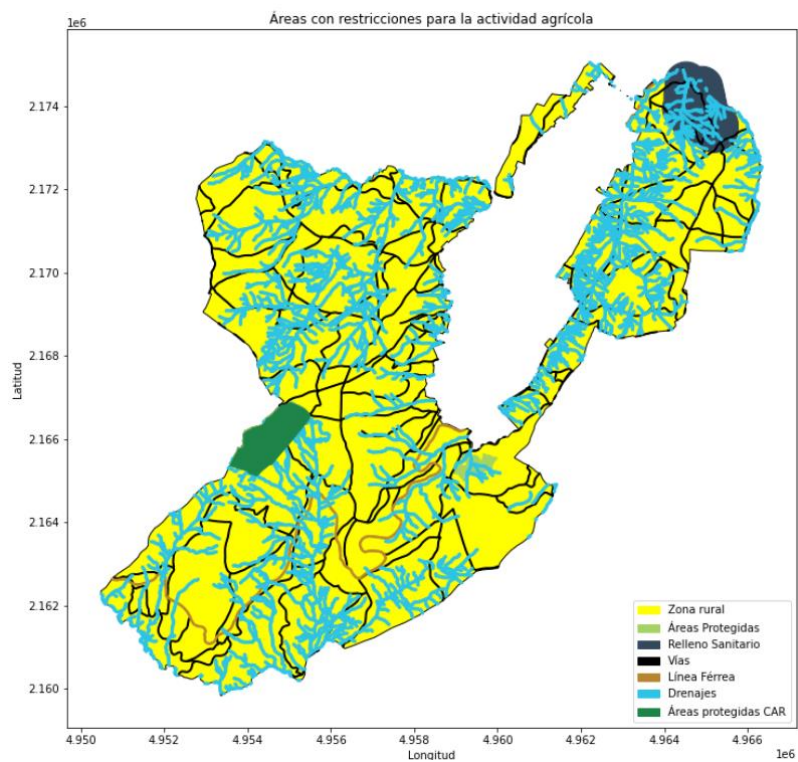


Figura 4. Capas de restricciones (vector)

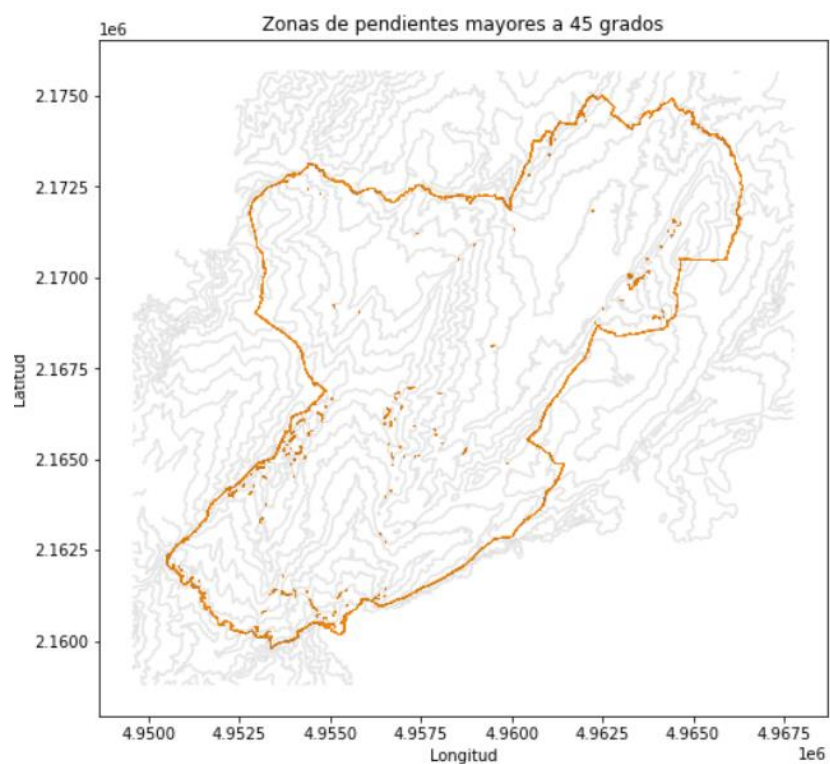


Figura 5. Zonas de pendiente 45°

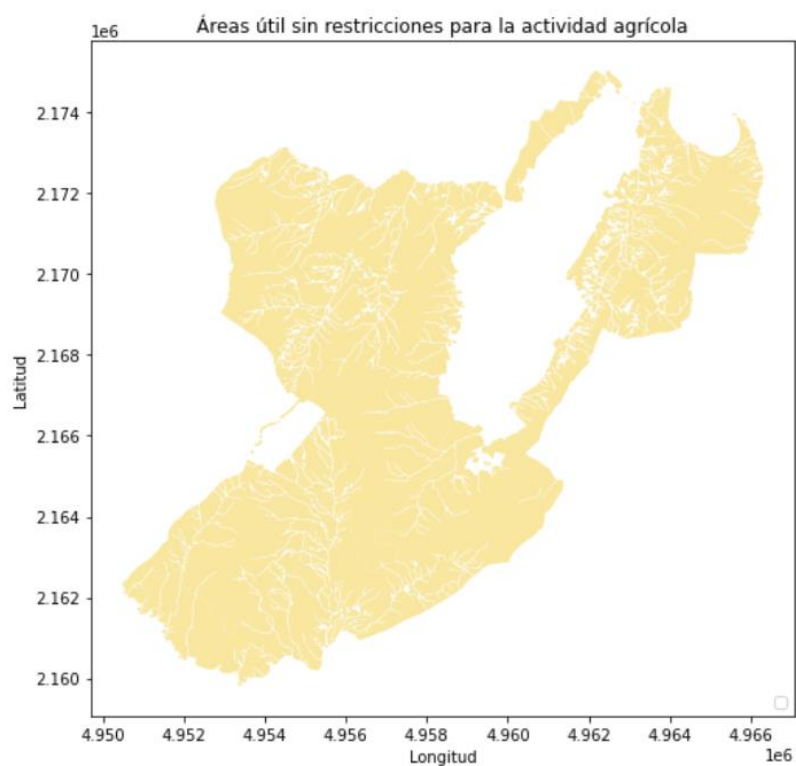


Figura 6. Área útil preliminar

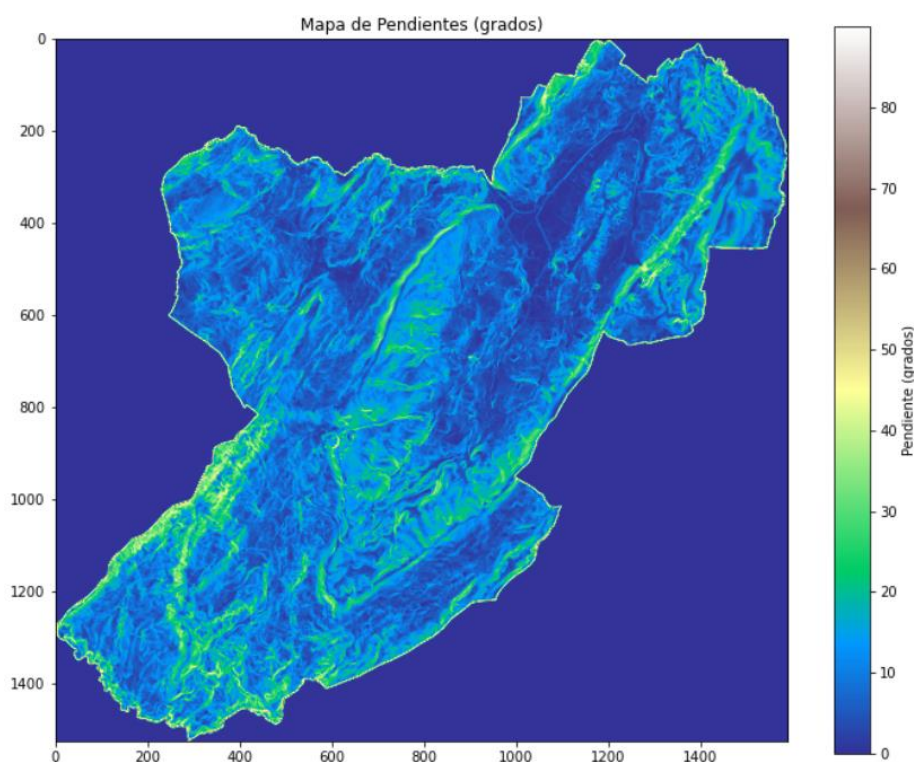


Figura 7. Pendientes área de estudio

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del análisis espacial permitieron identificar y cartografiar las áreas rurales del municipio de Tunja que presentan las condiciones favorables para la producción agrícola. Se logró la delimitación de zonas libres de restricciones, limitantes y/o condicionantes tales como áreas protegidas, drenajes, vías, áreas de protección y otros elementos que limitan el uso agrícola del suelo.

El modelo desarrollado en Python, utilizando librerías como *geopandas* y *folium*, facilitó la visualización de las áreas aptas mediante mapas interactivos y estáticos. El análisis reveló que aproximadamente el **X%** del área rural de Tunja es viable para la producción agrícola, y **X%** permiten el uso agrícola con algunas restricciones y/o limitantes, destacándose las veredas de **XXXXXX**.

Además, se generaron mapas temáticos que ilustran la superposición de restricciones y limitantes, permitiendo una comprensión más clara de las dinámicas territoriales. La herramienta desarrollada no solo optimiza el proceso de evaluación de tierras, sino que también proporciona una base sólida para la toma de decisiones en la planificación agrícola del municipio.

La implementación de este estudio demostró ser eficaz para el análisis de grandes volúmenes de datos geoespaciales, y su metodología puede ser adaptada y aplicada a otros municipios y regiones del país, promoviendo así un enfoque sistemático y replicable en la evaluación de tierras.

BIBLIOGRAFÍA

- Agropecuaria, U. de P. R. (2013). *Evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios a nivel nacional metodología a escala general 1:100.000*. UPRA.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/36447>
- Bowlick, F. J., Bednarz, S. W., & Goldberg, D. W. (2020). Course syllabi in GIS programming: Trends and patterns in the integration of computer science and programming. *Canadian Geographies / Géographies Canadiennes*, 64(4), 495-511.
<https://doi.org/10.1111/cag.12544>
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991-2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Corrales, D. A. A., Andrés Felipe Rodríguez Vásquez, Luz Mery Gómez, Claudia Patricia Acosta Latorre, Claudia Liliana Cortés López, Fabiola Enciso Enciso, Edwin R. García Márquez, Luisa María Lagos Riaño, Alexis Vladimir Maluendas, Lizeth Ortiz Guengue, Mariana Ríos Ortigón, Oscar Romero Guevara, Cindy Elizabeth Rubiano, & Jaime Vergara Hincapié. (2018). *Evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios a nivel nacional. Metodología a escala general (1:100.000)*. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria - UPRA. https://upra.gov.co/es-co/Documents/01_Proyectos_Normativos/202102_Evaluaci%C3%B3n%20de%20tierras%20para%20la%20Zonificaci%C3%B3n.pdf
- Dixon, A. P. (2015). Review of GIS Tutorial for Python Scripting. *Cartographic Perspectives*, 80, 51-52. <https://doi.org/10.14714/CP80.1306>
- Etherington, T. R. (2011). Python based GIS tools for landscape genetics: Visualising genetic relatedness and measuring landscape connectivity. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(1), 52-55. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00048.x>
- Food and Agriculture Organization - FAO. (1997). *Zonificación agro-ecológica—Guía general*.
- GeoPandas 1.0.1*. (2013). GeoPandas org. <https://geopandas.org/en/stable/>
- Muenchow, J., Schäfer, S., & Krüger, E. (2019). Reviewing qualitative GIS research—Toward a

wider usage of open-source GIS and reproducible research practices. *Geography Compass*, 13(6), e12441. <https://doi.org/10.1111/gec3.12441>

Raimundo Mainar De Medeiros, Romildo Morant De Holanda, Luciano Marcelo Fallé Saboya, Moacyr Cunha FilhoManoel Vieira De França, & Wagner Rodolfo De Araújo. (2022).

Cultural skills for the municipality of Recife—Pernambuco, Brazil. *International Journal of Science and Research Archive*, 6(1), 208-218. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2022.6.1.0116>

Wiig, H., & García-Reyes, P. (2020). Wiig, H., & García-Reyes, P. *Land Use Policy*, 91, 104380. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104380>