



Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales en el municipio de Monguí, Boyacá.

Gabriel Alejandro Mesa Salamanca

Kevin Santiago Rodríguez León

Angie Shirley Mendoza Cañón

William Eduardo Torres Gutiérrez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica.

Directora: M.Sc. Martha Patricia Valbuena Gaona

Asesores de recursos académicos: Juan Pablo Charry Osorio (asesor bibliográfico), Claudia Marcela Cerón Rubio (asesora Centro de Escritura) y Elvia Lucía Sánchez García (asesora de integridad académica)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Mesa Salamanca et al., 2025)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Mesa Salamanca et al., (2025). <i>Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales en el municipio de Monguí, Boyacá</i> . [Informe final de trabajo de grado]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Territorios Inteligentes y Sostenibles

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [Turnitin], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestra más sincera gratitud a la Universidad de Manizales, institución que no solo nos brindó una formación académica de excelencia, sino que también nos ofreció un entorno propicio para nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestras familias, gracias por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante a lo largo de este proceso. Su paciencia, ánimo y compañía fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

Extendemos un especial agradecimiento a la M.Sc. Martha Patricia Valbuena Gaona, por su valiosa orientación, dedicación y compromiso. Su guía experta fue clave en el desarrollo de este trabajo, y su ejemplo profesional nos inspiró profundamente.

A todos los que de una u otra manera hicieron parte de este camino, ¡gracias!

Gabriel Mesa desea expresar un agradecimiento muy especial a Alejandra Cardona, por su amor incondicional, paciencia y constante apoyo a lo largo de este proceso. Por su compañía, por compartir ideas, esperanzas y momentos que se convirtieron en peldaños personales para materializar este proyecto

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
1. Planteamiento Del Problema De Investigación Y Su Justificación	10
1.1 Descripción del área problemática	11
1.2 Formulación del problema	13
1.3 Justificación	13
2. Objetivos	16
2.1 Objetivo general	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. Antecedentes	17
4. Referente normativo y legal	22
5. Referente teórico	25
6. Metodología	32
6.1 Enfoque metodológico	32
6.2 Tipo de estudio	33
6.3 Procedimiento	34
7. Resultados	52
7.1 Uso del Suelo	52
7.2 Influencias de las vías	53
7.3 Norma de Uso del Suelo	56
7.4 Áreas Homogéneas De Tierra Y Pendientes	57
7.5 Disponibilidad De Aguas Superficiales Permanentes	59
7.6 Zonas Homogéneas Físicas Rurales	60
6. Conclusiones	64
7. Recomendaciones	67
8. Referencias	69

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de uso de suelo	27
Tabla 2. Clasificación influencia de las vías	27
Tabla 3. Clasificación Disponibilidad de Aguas Superficiales Permanentes	31
Tabla 4. Parámetros para la segmentación de imagen	28
Tabla 5. Categorías de uso actual del suelo utilizadas	36
Tabla 6. Evaluación de la precisión de la clasificación supervisada con el algoritmo SVM	52

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Cobertura de las fuentes de DEMs usados para las correcciones radiométricas de terreno de los productos ALOS PALSAR	21
Ilustración 2. Comparación de clasificaciones supervisadas basadas en pixel (izquierda) y basadas en objetos (derecha), tomado de Kelly et al. (2011)	34
Ilustración 3. Segmentación de imagen para la clasificación supervisada por objetos	36
Ilustración 4. Resultado clasificación de uso actual del suelo por el algoritmo SVM	37
Ilustración 5. Resultado suavizamiento de la clasificación SVM	39
Ilustración 6. Resultado del suavizamiento de la clasificación resultante (izquierda) y el resultado preliminar (derecha)	39
Ilustración 7. TIN de Monguí	40
Ilustración 8. DEM generado a partir de curvas de nivel	41
Ilustración 9. DEM ALOS PALSAR	42
Ilustración 10. Raster Slope	43
Ilustración 11. Mapa de pendientes	44
Ilustración 12. Resultado algoritmo de vías CNN	44
Ilustración 13. Resultado ajuste clasificación de vías CNN	45
Ilustración 14. Cartografía Norma de Uso del Suelo de Monguí	47
Ilustración 15. Flow direction – Arcgis Pro	48
Ilustración 16. Flow accumulation – Arcgis Pro	49
Ilustración 17. Reclasificación en 5 Clases para drenajes	50
Ilustración 18. Drenajes sencillos obtenidos	51
Ilustración 19. Variable final Uso Actual del Suelo	53
Ilustración 20. Comportamiento del algoritmo CNN para la identificación de vías	54
Ilustración 21. Variable final Influencia Vial	56
Ilustración 22. Variable final Norma de uso del suelo	57
Ilustración 23. Variable final Áreas Homogéneas de Tierra	58
Ilustración 24. Variable final Pendientes	59
Ilustración 25. Variable final Disponibilidad de Aguas Superficiales Permanentes	60
Ilustración 26. Zonas Homogéneas Físicas Rurales finales obtenidas para el municipio de Monguí	61
Ilustración 27. Comparación Zonas Homogéneas Físicas Rurales 1993 - Propuestas	62
Ilustración 28. Comparación Variable Uso Actual del Suelo 1993 - Propuesto	62
Ilustración 29. Diagramas Variable Uso Actual del Suelo 1993 - Propuesto	63

Lista de símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
--------------------	----------------

AHT	Áreas Homogéneas de Tierra
ANT	Agencia Nacional de Tierras
CNN	Red Neuronal Convolutiva (Convolutional Neural Network)
DEM	Modelo Digital de Elevación (Digital Elevation Model)
EOT	Esquema de Ordenamiento Territorial
SVM	Máquinas de Soporte Vectorial (Support Vector Machine)

Resumen

Este proyecto tiene como propósito actualizar las Zonas Homogéneas Físicas Rurales del municipio de Monguí, Boyacá, mediante el uso de herramientas geoespaciales e inteligencia artificial. Ante la alta desactualización catastral en áreas rurales del país, lo que afecta la planificación fiscal y territorial, así como la gestión de recursos y políticas públicas, se propone una metodología práctica y eficiente para identificar y clasificar las Zonas Homogéneas Físicas. Los insumos requeridos son imágenes satelitales de alta resolución espacial y temporal, junto con Modelos Digitales de Elevación (DEM). Se emplearon algoritmos de aprendizaje automático, como las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), para analizar el uso actual del suelo. Asimismo, se implementaron Redes Neuronales Convolucionales (CNN) para identificar y categorizar las vías rurales. Estos análisis fueron complementados con información oficial y validados mediante indicadores técnicos como el coeficiente Kappa, que mide el grado de concordancia, y el F1 Score, que evalúa el equilibrio entre precisión y sensibilidad del modelo. Para determinar las pendientes y disponibilidad de aguas superficiales permanentes se identificaron flujos de acumulación mediante el análisis de un DEM.

Los resultados demostraron que esta metodología permite delimitar con precisión las zonas homogéneas físicas rurales, facilitando una mejor comprensión del territorio y reduciendo los tiempos de análisis frente a los métodos tradicionales. Este enfoque, además de ser eficiente, tiene potencial de replicabilidad en otras regiones, lo cual contribuiría a una gestión territorial más eficaz y a la toma de decisiones basada en información precisa y actualizada.

Palabras clave: inteligencia artificial, percepción remota, análisis de imágenes satelitales, machine learning, deep learning, Zonas Homogéneas Físicas Rurales, actualización catastral

Abstract

This project aims to update the Rural Homogeneous Physical Zones (ZHF Rurales) of the municipality of Monguí, Boyacá, through the use of geospatial tools and artificial intelligence. Given the significant cadastral outdatedness in rural areas of the country, which affects fiscal and territorial planning as well as the management of resources and public policy, a practical and efficient methodology is proposed to identify and classify Homogeneous Physical Zones. The required inputs include high-resolution spatial and temporal satellite imagery, along with Digital Elevation Models (DEM). Machine learning algorithms such as Support Vector Machines (SVM) were used to analyze current land use, while Convolutional Neural Networks (CNN) were implemented to identify and categorize rural roads. These analyses were complemented with official data and validated using technical indicators such as the Kappa coefficient, which measures the level of agreement between classification and reality, and the F1 Score, which reflects the balance between precision and recall. To determine slopes and the availability of permanent surface water, flow accumulation was identified through DEM analysis.

The results demonstrated that this methodology enables precise delineation of rural homogeneous zones, improving territorial understanding and significantly reducing analysis time compared to traditional methods. In addition to being efficient, this approach has strong potential for replication in other regions, contributing to more effective territorial management and decision-making based on accurate and up-to-date information.

Keywords: Remote sensing, Satellite imagery análisis, Machine learning, Deep Learning, Rural homogeneous physical zones, Cadastral update

1. Planteamiento Del Problema De Investigación Y Su Justificación

Uno de los retos más grandes de todo proceso de actualización catastral, es la determinación de los valores del avalúo catastral de los bienes inmuebles, el cual es un insumo fundamental para la determinación del valor de las áreas rurales de forma masiva. Este proceso es definido como la valuación de un grupo de propiedades respecto a una fecha dada usando información común, métodos estandarizados, y pruebas estadísticas. Estos modelos de valuación masiva buscan representar el valor de mercado para un tipo específico de propiedad en un área específica, identificando los factores que son determinantes para su valor (International Association of Assessing Officers., 2017). .En particular, en el escenario colombiano, el Decreto 148 de 2020 define que “La determinación del valor catastral de los inmuebles será realizada a través de avalúos puntuales o masivos por los Gestores Catastrales o por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)” (Decreto 148 de 2020 artículo 2.2.2.6.2), y la Resolución única de la gestión catastral multipropósito 1040 de 2023 del IGAC reitera que, para los procesos de formación y actualización catastral, se determinarán los valores de los avalúos catastrales de manera masiva a través de métodos de valoración regulados (IGAC, 2023). En este sentido, la metodología dominante para la determinación masiva del avalúo catastral es el estudio de Zonas Homogéneas Físicas y Geoeconómicas (IGAC, 2021) (IGAC, 2020). Definidas como las áreas geográficas con similitudes, en diferentes aspectos como por ejemplo variables topográficas, redes de servicios públicos, variables de uso de suelo y otras condiciones que hacen que el terreno sea homogéneo. Estas variables, son evaluadas con base a criterios económicos y unidades de precio similares para determinar su valor en el mercado inmobiliario (Cali, 2015).

La determinación de las zonas homogéneas físicas se basa en la constitución de variables pertinentes para la agrupación de los bienes inmuebles rurales, y para el levantamiento de la información necesaria en la constitución de dichas variables, se debe hacer uso de metodologías eficientes que faciliten este trabajo de gran escala (International Association of Assessing Officers., 2017), siendo los algoritmos de inteligencia artificial una de las herramientas que ha demostrado capacidad para la identificación de características físicas a gran escala en imágenes de teledetección, proporcionando una clasificación precisa y automatizada de elementos como vías, cuerpos de agua y comportamiento general de coberturas (Deepan et al., 2018) (Helber et al., 2019). Es claro que a través de los mismos se presenta la oportunidad única de actualizar las

metodologías tradicionales de valuación masiva, hecho primordial para la evolución progresiva del mercado de bienes raíces, y el desarrollo de sistemas gravables equitativos y eficientes (Paladi, 2024), con tecnología eficiente que reduce los costos frente a metodologías tradicionales (Wei et al., 2022), y permitiendo la transición hacia las tecnologías emergentes, con alta fiabilidad y capacidad de actualización temporal única para la utilización de la información catastral en múltiples campos y aplicaciones (*Cadastral 2034 | Toitū Te Whenua - Land Information New Zealand*, 2014).

En particular, el municipio de Monguí presenta un escenario único para la implementación de nuevas metodologías para la determinación de zonas homogéneas físicas, siendo el componente rural en particular uno altamente beneficiado en consideración de la necesidad de cubrir grandes áreas de terreno, y siendo un municipio en aras de entrar a un proceso de actualización catastral (IGAC, 2024b).

1.1 Descripción del área problemática

La actualización catastral, definida como el “conjunto de actividades destinadas a identificar, recoger, incorporar o rectificar en la base de datos catastral los cambios o inconsistencias en la información catastral en sus componentes físicos, jurídicos y económicos, en un territorio objetivo, durante un período determinado” (IGAC, 2024). Es un proceso primordial para el desarrollo del territorio, históricamente, desde las civilizaciones egipcias en 3000 AC, chinas en 700AD, se han implementado sistemas para brindar seguridad jurídica a la propiedad de la tierra, estos sistemas continuaron modernizándose a través de la historia (FIG, 2020). Modernizándose e influenciándose por corrientes europeas en los siglos XVIII y XIX para configurar lo que hoy se define como catastro moderno (Williamson, 2011).

En el escenario colombiano, la construcción de un inventario de los bienes inmuebles debidamente actualizado ha probado ser, por la historia, tradición, topografía, recursos y dinámicas del país, uno de los retos más grandes que se enfrentan como nación. El Acuerdo de Paz el 24 de noviembre de 2016, donde se reconoce al catastro como un instrumento necesario para dar seguridad jurídica a la propiedad, adelantar programas de ordenamiento social de la propiedad y tomar decisiones de política pública sobre planeación social, económica y ambiental de los territorios (INDEPAZ, 2022), un pilar fundamental de la reforma agraria con la ANT como entidad

protagonista. La posterior asignación de recursos y estrategias para la implementación del catastro multipropósito con el CONPES 3958, y la búsqueda a través de la Ley 2294 de 2024 y el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia Potencia Mundial para la Vida”(Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, 2023), son unos de los hitos más importantes que manifiestan fehacientemente la intención del país por implementar un catastro multipropósito para contribuir a la seguridad jurídica del derecho de propiedad inmueble, al fortalecimiento de los fiscos locales, al ordenamiento territorial y la planeación social y económica (ICDE, 2022). A nivel nacional, se evidencia según el CONPES 4128 de 2024 una desactualización catastral del 60,48% en el área urbana, y de un 87,77% del área rural en los municipios del país, con el 79,79% de los municipios con una desactualización catastral de más de 10 años en zona urbana, y 82,55% en zona rural (Reajuste de avalúos catastrales para la vigencia 2024. Departamento Nacional de Planeación., 2023) (CONPES, 2023 4128).

El municipio de Monguú, con aproximadamente 4397 habitantes y con una categoría 6 (Contraloría, 2024) localizado en la parte oriental de departamento de Boyacá, en la Provincia de Sugamuxi, en particular manifiesta esta necesidad de una actualización catastral, con una vigencia urbana y rural para su última actualización catastral del año 1993, es evidente porque el IGAC ha decidido que sea uno de los municipios priorizados para desarrollar actualización catastral con recursos de la banca unilateral (IGAC, 2024a). La economía municipal en Monguú también tiene un enfoque significativo en lo rural, con una extensión del 98,99% de su territorio correspondiente a zona rural, y actividades de ganadería, minería, agroindustrial y agricultura entre las actividades más destacables del municipio (Cundinamarca, 2019), actualmente, el Esquema de Ordenamiento Territorial de municipio de Monguú, adoptado por el Acuerdo Municipal 7 del 21 de Abril de 2004 establece los usos permitidos para las áreas urbanas y rurales, identifica la necesidad de proteger el suelo y los recursos naturales, de poder solventar los conflictos del manejo de tierras, y resalta la importancia de preservar las fuentes hídricas, áreas de páramo, y en general, de generar un plan de desarrollo que permita el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes del municipio. Articulado con su Plan de Desarrollo Territorial 2024-2027. Adoptado por el Acuerdo 8 del 11 de junio de 2024, resalta la importancia de formalizar la propiedad del municipio, y el desarrollo sostenible y la protección medioambiental, hechos articulados estrechamente con el desarrollo de la actualización catastral en el municipio, y en particular, de las Zonas Homogéneas Físicas rurales

del mismo, que permitirán la delimitación clara de variables pertinentes para la protección de los recursos hídricos, la identificación de uso del suelo, y en general, de información primordial para la caracterización del escenario rural municipal para la generación de políticas públicas, planes, programas y proyectos municipales.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo pueden los algoritmos de inteligencia artificial, a través del uso de Machine Learning y Deep Learning aplicados a imágenes satelitales, contribuir a la identificación y generación precisa de las Zonas Homogéneas Físicas Rurales en el municipio de Monguú, Boyacá?.

1.3 Justificación

El municipio de Monguú se encuentra dentro de los municipios priorizados por el (IGAC, 2024c) para el desarrollo de actualización catastral para la implementación del catastro multipropósito en el municipio, dicha actualización manifiesta su pertinencia en consideración de que la última actualización catastral de Monguú para sus componentes urbano y rural fue desarrollada en el año 1993, con más de 30 años de vetustez. Con esta actualización, se espera contribuir al fortalecimiento fiscal del municipio, a las capacidades del municipio para avanzar en los procesos de formalización, legalización y adjudicación de tierras, al ordenamiento territorial, optimización del mercado inmobiliario, la gestión medioambiental, y en general, al desarrollo y sostenible del mismo.

En todo proceso de actualización catastral, uno de los factores más importantes es la caracterización del componente económico de los inmuebles, a partir de la necesidad de poder realizar un estudio económico masivo y competente para abarcar grandes escalas de información, el IGAC genera la metodología de Zonas Homogéneas Físicas y Geoeconómicas, las cuales se determinan de forma diferencial para sus componentes urbano y rural. En particular, las Zonas Homogéneas Físicas son definidas como “Espacios geográficos con características similares en cuanto a vías, topografía, servicios públicos, uso actual del suelo, norma de uso del suelo, tipificación de las construcciones o edificaciones, áreas homogéneas de tierra, acceso aguas para la producción agropecuaria u otras variables que permitan diferenciar estas áreas de las adyacentes

(IGAC, 2024c). Este componente físico en las zonas rurales, acorde a la metodología IGAC (2021) se determina a partir de 6 variables principales a tener en cuenta:

1. Áreas homogéneas de tierras: Se refiere a la delimitación de áreas con características similares en términos de uso y condiciones del suelo.
2. Norma de uso del suelo: La reglamentación oficial que define los usos permitidos del suelo en determinadas áreas.
3. Uso actual del suelo: La actividad actual que se desarrolla en el terreno, como agrícola, pecuaria, forestal, etc.
4. Influencia de las vías: La proximidad y calidad de las vías de acceso que influyen en la valoración de los terrenos.
5. Disponibilidad de aguas superficiales permanentes: La existencia de cuerpos de agua cercanos que pueden ser aprovechados para uso agrícola u otras actividades.
6. Otras variables que afecten el avalúo: Factores adicionales que, debido a sus características particulares, impactan el valor del terreno.

Siendo el municipio de Monguí uno con cobertura predominantemente rural, la determinación de las variables físicas competentes para las Zonas Homogéneas Físicas Rurales presenta un reto importante en el proceso de actualización catastral, y es claro que al ser un insumo principal para la determinación del avalúo catastral de los inmuebles, deben ser determinadas a partir de información fiable y pertinente, pero también de una manera eficiente que permita la ejecución de los procesos en un tiempo razonable. La recolección de estas variables por métodos tradicionales puede traducirse en la necesidad de múltiples interventores, por métodos manuales que puedan traducirse en múltiples visitas a campo, o el análisis en oficina de múltiples datos sin procesar para una correcta delimitación, por lo que los sensores remotos, se convierte en la herramienta idónea para recolección de estas variables (Richards, 2005) (R. Bennett et al., 2020). Este hecho se vuelve aún más evidente cuando consideramos la posibilidad de automatizar los procesos de identificación a partir de dichos sensores remotos, donde la inteligencia artificial se convierte en un agente primordial, con la posibilidad de reducir costos, tiempos para la obtención de información verídica sobre las coberturas y características físicas de las imágenes (Liu et al., 2023).

Con esto, este proyecto de investigación servirá como un insumo que integra la tecnología para la determinación a partir de metodologías modernas de las Zonas Homogéneas Físicas Rurales para el municipio de Monguí, permitiendo la modernización de una metodología reconocida y consolidada a nivel nacional, dejando un precedente para la implementación de inteligencia artificial en los procesos catastrales, y generando información primordial para la actualización catastral con enfoque multipropósito del municipio de Monguí.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología de clasificación y actualización de las zonas homogéneas físicas rurales del municipio de Monguí, Boyacá, utilizando algoritmos de inteligencia artificial y herramientas geoespaciales dispuestas en ArcGIS Pro, para la determinación de variables clave como el uso del suelo, topografía, la influencia vial y la disponibilidad de aguas, contribuyendo a la actualización catastral y al ordenamiento territorial del municipio.

2.2 Objetivos específicos

- 1.** Recolectar y analizar la información existente sobre las Áreas Homogéneas De Tierra y la norma de uso del suelo, utilizando fuentes oficiales y el Esquema de Ordenamiento Territorial vigente, como insumo base para la determinación de zonas homogéneas físicas rurales.
- 2.** Implementar algoritmos de Machine Learning consolidados en herramientas de Sistemas de Información Geográfica para apoyar la identificación del uso actual del suelo en el área rural del municipio, a partir de imágenes satelitales de alta resolución.
- 3.** Aplicar algoritmos de Deep Learning consolidados en herramientas de Sistemas de Información Geográfica para apoyar la identificación de influencia de las vías sobre las zonas rurales, utilizando imágenes satelitales actualizadas.
- 4.** Implementar herramientas avanzadas de análisis geoespacial para evaluar la disponibilidad de aguas superficiales permanentes, integrando datos de sensores remotos y análisis de pendientes mediante la generación y procesamiento de modelos digitales de elevación
- 5.** Integrar las variables identificadas y, conforme a lo establecido por la metodología IGAC, combinarlas para generar categorías únicas que permitan la delimitación y modelado final de las Zonas Homogéneas Físicas Rurales del municipio de Monguí, con su respectiva representación cartográfica.

3. Antecedentes

La modernización de los procesos catastrales, y en particular, de la actualización catastral ha sido tema de gran interés a nivel global, según Krelle & Rajabifard (2014) y (Gang et al., 2008), quienes destacan la importancia de la temporalidad de la información catastral, y su necesidad por ser constantemente actualizada, al ser los sistemas catastrales una herramienta esencial para el desarrollo económico, la gestión medioambiental, y la estabilidad social de tanto países desarrollados, como países en vías de desarrollo.

En Colombia, el IGAC define el documento técnico “Elaboración del Estudio de Zonas Homogéneas Físicas y Geoeconómicas y Determinación del Valor Unitario e Integral (PH) por Tipo de Construcción”(IGAC, 2021), donde se exponen las variables físicas necesarias para la determinación de las zonas homogéneas físicas rurales:

1. Áreas Homogéneas de Tierra (AHT)
2. Norma de uso del suelo
3. Uso actual del suelo
4. Influencia de las vías
5. Disponibilidad de aguas superficiales permanentes
6. Otras variables que por sus características deben tenerse en cuenta

La recolección de estas variables juega un papel fundamental en la determinación de los valores unitarios de terreno, con varias de las mismas, presentando la particularidad de poder ser identificables mediante sensores remotos. En este sentido, la implementación de sensores remotos, a través de los años, ha sido aceptada y consolidada como una herramienta pertinente y esencial para la implementación del catastro, pasando de ser considerado como métodos crudas que no pueden ser consideradas como una solución integral para el problema de catastro (Dale & McLaughlin, 2000). Los sensores remotos se convierten en un insumo fundamental de la captura de datos de límites administrativos y prediales, la clasificación de coberturas y determinación de

uso del suelo, sus características y elementos, y el monitoreo de cambios en la tierra para la administración de tierras y el catastro (R. M. Bennett et al., 2021).

Kocur-Bera & Grzelka (2022) destacan la importancia de la fotogrametría y percepción remota para la actualización catastral, destacando su eficiencia, fiabilidad y reducción en los tiempos necesarios para técnicas modernas relacionadas a comparación de métodos tradicionales, y autores como (Mika, 2019), Okumu (2013), y Vogiatzis (2006) resaltan la relevancia de los sensores remotos a nivel global para la modernización e implementación del catastro multipropósito.

Uno de los mayores beneficios de la implementación de sensores remotos es la capacidad de poder implementar algoritmos que permitan la automatización de procesos, en particular, para detección de variables pertinentes para las Zonas Homogéneas Físicas Rurales, los algoritmos de inteligencia artificial Deep Learning y Machine Learning han demostrado resultados positivos. Estudios recientes como el de Xia et al. (2019) demuestran la capacidad de los algoritmos de Deep Learning, en particular, de las CNN, pudiendo identificar con precisiones del 0.79% los límites parcelarios, superior a metodologías como la segmentación multi resolución y el algoritmo de probabilidad global para segmentación. Crommelinck et al. (2019) exponen las CNN como una herramienta idónea para la clasificación de líneas de lindero, estimando una optimización del 38% en la clasificación de coberturas, y 80% menos clicks comparado a una delineación manual de coberturas. En particular, para la detección de vías Ayala et al., (2021), destaca la aplicación de detección de vías para el monitoreo del desarrollo de los territorios, y, a través de CNNs, en conjunto con información base pertinente, caracteriza de manera verídica con precisiones de más del 82%, incluso con imágenes satelitales de resolución de solo 10m. Henry et al. (2018) destaca la importancia de la correcta configuración y arquitectura de las redes neuronales convencionales para una segmentación correcta de las rutas, y (Abdollahi et al., 2020) demuestran que el algoritmo CNN se encuentra entre los más eficientes en la actualidad para la extracción de vías mediante sensores remotos.

Respecto a la detección de cuerpos de agua y el Machine Learning, Yagmur et al. (2019) demuestra que el uso de imágenes multiespectrales puede permitir precisiones de hasta el 88,10% para la detección de cuerpos de agua utilizando algoritmos SVM, Misra et al. (2018) muestran cómo a partir de imágenes multiespectrales y algoritmos SVM, es posible no solamente la caracterización de cuerpos de agua, sino también la estimación de alturas y aplicaciones directas

en batimetría, Bangira et al. (2019) destacan la importancia de las imágenes satelitales y la existencia de múltiples constelaciones que permiten el acceso a información actualizada y con cobertura a nivel global, permitiendo productos operacionales muy cercanos al tiempo real, y destaca la necesidad de la implementación de métodos automatizados y confiables para la captura de información para el mapeo y monitoreo de cuerpos de agua, destacando los algoritmos de máquinas de vector soporte como uno de alta precisión, y con poca sensibilidad a variaciones causadas por partículas disueltas, plantas acuáticas, y turbiedad del agua por sedimentos, obteniendo precisiones del 91,7%, manteniendo un alto nivel de precisión de 82% aún en zonas consideradas de mayor dificultad para la detección de cuerpos de agua.

Mountrakis et al., (2011) exponen la importancia de los algoritmos SVM para la identificación de usos y coberturas, con posibilidad de aplicación en la planeación regional, el manejo medioambiental, la gestión de riesgos, entre otras aplicaciones, que si bien puede recaer en elementos de un acercamiento de prueba y error, provee resultado verídicos de alta precisión, Talukdar et al. (2020) demuestra a través de una aplicación empírica la capacidad de algoritmos SVM, pudiendo superar algoritmos de lógica difusa, distancia de Mahalanobis y de mapeo de ángulos espectrales, con precisiones del 0,86%, estando entre los algoritmos más aptos junto con las redes neuronales artificiales y los Random Forest.

R. Bennett et al. (2020) destacan cómo la incorporación de tecnologías de percepción remota, como el LIDAR y el radar de apertura sintética (SAR), ha permitido revolucionar los procesos catastrales. Estas herramientas han demostrado ser cruciales para la captura eficiente y precisa de datos topográficos, linderos y características físicas del territorio. Particularmente, su capacidad para trabajar en condiciones climáticas adversas, como nubosidad densa, ha hecho que estas tecnologías sean ideales para regiones rurales donde la recolección manual de datos puede ser costosa y poco eficiente.

Yagmur et al.(2019) llevaron a cabo una investigación para mapear cuerpos de agua utilizando algoritmos SVM aplicados a imágenes multiespectrales. Su trabajo evidenció que los SVM pueden lograr una precisión de hasta el 91%, incluso en escenarios complejos donde la turbiedad del agua y la vegetación circundante dificultan el análisis. Este enfoque ha sido particularmente útil para caracterizar zonas rurales con limitaciones de acceso, mejorando la disponibilidad de datos precisos para la planificación territorial.

Crommelinck et al. (2019) exploraron la efectividad de las CNN en la clasificación de coberturas terrestres y linderos catastrales. En su estudio, lograron optimizar los procesos manuales en un 38%, con una reducción significativa en el número de correcciones necesarias durante las tareas de clasificación. Este avance resalta el potencial de las CNN para automatizar procesos catastrales complejos, ahorrando tiempo y recursos.

De manera general, podemos evidenciar como la inteligencia artificial aplicada a imágenes remotas con resoluciones espaciales pertinentes ha presentado un progreso significativo en la extracción de coberturas, cambios de detección, clasificación y extracción automática de información pertinente para la administración de tierras, el catastro y el ordenamiento territorial (Koeva et al., 2022).

También, es importante destacar el papel de los sensores remotos en la constitución de DEMs, pudiendo representar alturas a través de tecnologías modernas como el LIDAR, las imágenes aéreas, entre otras (R. M. Bennett et al., 2021), en particular, las imágenes de radar, y las imágenes de radar de apertura sintética SAR posibilitan la recolección de información incluso a través de cuerpos nubosos, ideal para la recolección de información de alturas al no depender de las condiciones de nubosidad, hecho demostrado por Valencia & Upegui (2020) al poder generar imágenes de cobertura en territorio colombiano a partir de dichas imágenes para épocas de nubosidad alta, con precisiones del 83%.

En particular, los DEMs generados por ALOS PALSAR generados a partir de correcciones radiométricas de terreno, para el caso de Colombia, con información de DEM base del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Pudiendo obtener para Colombia productos con resoluciones de pixel de 12.5m a partir del escalamiento de información DEM base de 30m. (ASF, 2015):

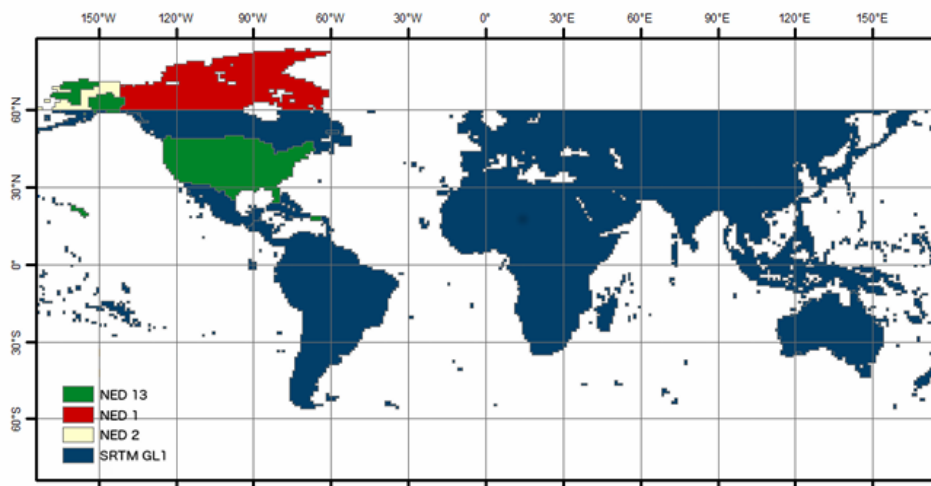


Figure 1: Coverage of the various DEM sources used for terrain correction

Ilustración 1. Cobertura de las fuentes de DEMs usados para las correcciones radiométricas de terreno de los productos ALOS PALSAR

Si bien la temporalidad de estos productos DEM ALOS PALSAR está limitada entre 2006 y 2011, estos insumos pueden ser significativos para la determinación de pendientes para el estudio de Zonas Homogéneas Físicas rurales en consideración del comportamiento invariante en el tiempo de las mismas. Leroueil & Picarelli, (2012) mencionan que las pendientes, en especial en zonas de poca actividad humana y cambios medioambientales drásticos, pueden mantenerse estables por cientos, incluso miles de años. Postill et al. (2021) resaltan la estabilidad de las pendientes en relación a la poca intervención humana, y destacan la presencia de bosques a través de largos periodos de tiempo como un indicador clave de la estabilidad a través del tiempo de la tierra, y la resiliencia de sus pendientes. Con esto, es posible ver cómo, a pesar de su atemporalidad respecto a otros insumos, los modelos digitales de elevación DEM pueden seguir manteniendo pertinencia a la fecha para la caracterización de variables para la constitución de ZHF Rurales, al ser zonas caracterizadas por intervenciones humanas de menor magnitud y en consideración de las coberturas de páramo del municipio.

4. Referente normativo y legal

- Ley 2294 de 2022

Define en su Sección V la Consolidación del Catastro Multipropósito y Tránsito hacia el Sistema de Administración del Territorio (SAT), la gestión catastral como un servicio público, y la posibilidad de implementar metodologías de actualización masiva para los avalúos catastrales con tecnologías avanzadas de recolección, para el procesamiento de datos a gran escala, y la reducción del rezago catastral, destacando la necesidad del catastro multipropósito por caracterizar aspectos socioeconómicos y ambientales, y refuerza su pertinencia para la planificación ambiental del territorio y la gestión del suelo (Ley 2294 de 2022, 2023).

- Ley 1955 de 2019 (Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022)

Esta ley establece los lineamientos para el desarrollo del catastro multipropósito en Colombia, que busca la actualización y modernización de la información catastral para integrarla con los planes de ordenamiento territorial. La ley resalta la importancia de un enfoque integral que incorpore tecnologías avanzadas, incluyendo imágenes satelitales y modelos digitales de elevación, para mejorar la gestión del territorio y la eficiencia fiscal (Ley 1955, 2019).

- Decreto 1420 de 1998

Expedido por el Ministerio de Desarrollo Económico, en su capítulo tercero detalla los procedimientos para la elaboración de avalúos, y en su capítulo cuarto establece los parámetros y criterios para la elaboración de los avalúos (República de Colombia, 2011)

- Decreto 148 de 2020

Expedido por la Presidencia de la República, establece las disposiciones generales del Servicio Público de Gestión catastral, definiendo en el capítulo 2 los procedimientos catastrales del enfoque multipropósito, determinando la información que construirá la base catastral, los métodos de recolección y procesos catastrales de formación, conservación, actualización y difusión catastral (Decreto de ley, 148, 2020).

- Resolución 1040 de 2023 del IGAC

Emitida por el IGAC establece la reglamentación técnica actualizada para los procesos de formación, actualización, conservación y difusión catastral bajo un enfoque multipropósito. Este

marco normativo refuerza la necesidad de implementar metodologías modernas que optimicen la recolección, análisis y uso de información geográfica, asegurando que los datos catastrales sean precisos, actualizados y útiles para la gestión territorial sostenible (IGAC, 2023).

- Documento PC-GCT-03 de 2024 del IGAC

Define los procedimientos para la elaboración, revisión, modificación y ajustes de los estudios de zonas homogéneas físicas y geoeconómicas (PC-GCT-03, 2024).

- Documento IN-FAC-PC03-01 de 2021 del IGAC

Instructivo general para la elaboración del estudio de Zonas Homogéneas Físicas y Geoeconómicas, y la determinación del Valor Unitario e Integral (PH) por tipo de construcción (IN-FAC-PC03-01, 2021).

- Resolución 746 de 2024 – IGAC

Mediante esta resolución se introducen ajustes técnicos a la Resolución 1040 de 2023, permitiendo una mayor flexibilidad en la aplicación de métodos de levantamiento catastral (directos, indirectos y colaborativos), e integrando criterios que favorecen la interoperabilidad con el modelo extendido Catastro-Registro (LADM_COL), promoviendo una articulación más eficiente entre la información física, jurídica y económica del territorio (IGAC, 2024d).

- Resolución 1912 de 2024 – IGAC

Establece una metodología para la actualización masiva de valores catastrales en zonas con rezago, en el marco del artículo 49 de la Ley 2294 de 2023. Esta herramienta técnica permite ajustar automáticamente los avalúos en áreas rurales con valores significativamente desfasados, y busca mejorar la equidad en la carga tributaria a nivel local (IGAC, 2024e).

- Resolución Conjunta 662 de 2024 – IGAC y SNR

Adopta el Modelo Extendido Catastro-Registro bajo el estándar LADM_COL como marco de referencia nacional para la articulación entre bases catastrales y registrales. Esta resolución busca avanzar en la interoperabilidad entre entidades y en la consolidación de un Sistema de Administración del Territorio moderno, estructurado y confiable (IGAC & SNR, 2024)

- Plan Operativo de Formación y/o Actualización Catastral 2023–2024 – IGAC

Este documento técnico define las acciones priorizadas del Instituto para los años 2023 y 2024 en materia de formación y actualización catastral. En él se establece una ruta operativa por

municipios, se promueve el uso de tecnologías como imágenes satelitales y modelos digitales de terreno, y se refuerza la implementación del catastro multipropósito con herramientas modernas y enfoque territorial (Plan Operativo Catastral, 2023).

- Informe sectorial de rendición de cuentas 2023–2024 – DANE e IGAC

Presenta los avances interinstitucionales en la implementación del catastro multipropósito y su articulación con el sistema estadístico y geográfico nacional. Se destaca el papel del IGAC en el fortalecimiento de las capacidades técnicas, la modernización de la infraestructura de datos espaciales y la consolidación de un catastro útil para la planificación, la inversión y la seguridad jurídica de la propiedad (Contreras et al., 2023)

5. Referente teórico

El catastro multipropósito es el “Inventario o censo de los bienes inmuebles localizados en el territorio nacional, de dominio público o privado, independiente de su tipo de tenencia, el cual debe estar actualizado y clasificado con el fin de lograr su identificación física, jurídica y económica con base en criterios técnicos y objetivos” (Presidencia de Colombia, 2020). La capacidad de la información catastral es un insumo para la generación de políticas públicas, la gestión territorial, el ordenamiento territorial, la planeación del desarrollo, la optimización del mercado inmobiliario, y la seguridad jurídica de los bienes inmuebles, de una manera interoperable con la información del registro público de los bienes y otras entidades y elementos del sistema de información del territorio (SisPT, 2023).

La implementación del catastro a nivel mundial ha significado un reto difícil de cumplir, a nivel global, para 2016 según lo indicado por S Enemark. et al. (2016), se estima que más del 70% de la población mundial no tiene acceso a un sistema catastral formal, realidad coherente con la realidad colombiana y considerando que se cuenta un nivel de desactualización catastral del 60,48% en el área urbana, y de un 87,77% del área rural en los municipios del país, y con el 79,79% de los municipios con una desactualización catastral de más de 10 años en zona urbana, y 82,55% en zona rural (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2023). Es evidente la necesidad colombiana de poder contar con un catastro multipropósito actualizado, hecho por el cual se han avanzado diferentes mecanismos de financiación como el CONPES 3859 de 2016, y el CONPES 3958 de 2019, producto de estos avances, el municipio de Monguí, cuya última actualización catastral para los componentes urbano y rural fue en 1993 (Departamento Nacional de Planeación, 2024) (CONPES, 2016), (CONPES 2019) presenta ahora la posibilidad de desarrollar la actualización catastral financiada por recursos de la banca multilateral (IGAC, 2024).

En este sentido, el desarrollo de las Zonas Homogéneas Físicas y Goeconómicas del municipio jugará un papel fundamental para la constitución de un catastro multipropósito pertinente, verídico y acorde con la realidad del territorio, y, en consideración de las Zonas Homogéneas Físicas Rurales, la implementación de inteligencia artificial para la determinación de

variables, puede traducirse en beneficios económicos y temporales para el proceso de actualización. Crommelinck et al. (2019), (Kocur-Bera & Grzelka, 2022), Okumu (2013).

En general, la determinación de las variables físicas utilizadas para la determinación de zonas homogéneas físicas rurales se encuentra definida por el IGAC (2021) en el documento técnico “Elaboración del estudio de zonas homogéneas físicas y geoeconómicas y determinación del valor unitario e integral (PH) por tipo de construcción”:

1. **AHT:** Esta variable está definida como espacios de la superficie terrestre que clasifican el suelo rural de acuerdo con su aptitud agrológica. Basados en sus propiedades físicas, químicas, climatológicas y topográficas.
Las AHT son elaboradas a partir de una metodología de caracterización de tierras para catastro, en pro de elaborar los avalúos rurales de forma masiva, con un nivel de precisión aceptable, efectuando un estudio generalmente a escala 1:25.000, o 1:10.000, determinando así espacios de la superficie terrestre, que presentan características o cualidades similares en cuanto a unidades climáticas, relieve, material litológico o depósitos superficiales y de suelos, que expresan la capacidad productiva de las tierras.
2. **Norma de uso del suelo:** corresponde a la actividad que se puede desarrollar en un determinado espacio geográfico de conformidad con lo planificado y reglamentado por la respectiva autoridad de la unidad orgánica catastral. En los estudios de Zonas Homogéneas Físicas, se determina la variable normativa proveniente de los Planes de Ordenamiento Territorial y otras normas de orden general. Para su elaboración, se debe consultar el Plan de Ordenamiento Territorial – POT vigente del municipio y tomar lo concerniente al catastro en lo que respecta a la clasificación de los usos del suelo (áreas de actividad).
3. **Uso actual del suelo:** Es la actividad que se desarrolla en un determinado espacio geográfico, en el momento de la elaboración del estudio de zonas homogéneas físicas. Corresponde a la utilización que se le da al suelo y se observa en el momento del estudio. La forma de determinar la zonificación por el uso actual del suelo es:
 - a. Contando con fotografías de contacto de reciente toma, se hace la delimitación de diferentes coberturas.

- b. En terreno, haciendo recorrido por zonas, se determinan zonas por tipos de uso y cobertura.

Tabla 1. Tipos de uso de suelo

Codigo	Uso	Codigo	Uso
1	Edificios	9	Pastos naturales
2	Otras construcciones	10	Pastos artificiales
3	Parques Naturales	11	Pastos naturales mejorados
4	Cultivos de carácter permanente	12	Bosques
5	Tierras de labor irrigadas	13	Selvas vírgenes
6	Tierras de labor no irrigadas	14	Cuerpos de Agua
7	Tierras con maleza	15	Condiciones especiales
8	Tierras improductivas	16	Mixto

4. **Influencia de las vías:** Esta variable se determina mediante el reconocimiento y clasificación de las vías y la demarcación y categorización de las zonas de influencia de cada una de las mismas. Para la clasificación de esta variable, se consideran las vías como medio de acceso y recurso para la explotación agropecuaria. Dentro del estudio de zonas homogéneas físicas, debe tenerse en cuenta que la existencia o no de vías, el tipo de vía y el estado en que se encuentren, facilitan el acceso a los predios y el transporte de los productos agropecuarios para su comercialización. La zona de influencia se determina de acuerdo con las condiciones propias del lugar en estudio, teniendo en cuenta los accidentes geográficos (topografía, drenajes, etc.) que limitan su extensión y la densidad de la malla vial. Se clasifican de la siguiente manera:

Tabla 2. Clasificación influencia de las vías

Código	Descripción	Equivalencia cartografía básica	Clasificación
1	Vías buenas	Pavimentada, dos o más vías	1
		Sin pavimentar, dos o más vías	2
2	Vías regulares	Pavimentadas, vía angosta	3
		Sin pavimentar, vía angosta	4
3	Vías malas	Transitable en tiempo seco	5
		Carreable sólo para vehículos medianos	6
		Camino real o de herradura	7

4	Sin vías	Sendero	8
		Sin vías	9

5. **Disponibilidad de aguas superficiales permanentes:** En el estudio de esta variable se analiza la existencia de fuentes de aguas superficiales permanentes y su clasificación, con el fin de zonificar de acuerdo con la posibilidad de aprovechamiento para el uso actual que se da al suelo. Se clasifican de la siguiente manera:

Tabla 3. Clasificación Disponibilidad de Aguas Superficiales Permanentes

Clasificación	Descripción
Zonas con aguas abundantes	Áreas con sistemas de riego (gravedad o mecánico) o afiliadas a distritos de riego. Asociadas a pendientes planas o ligeramente planas, ideales para agricultura tecnificada o ganadería intensiva.
Zonas con aguas suficientes	Áreas con fuentes de agua permanentes (corrientes o estancadas), pero limitadas por la pendiente para riego o uso ganadero. Incluye zonas con acueductos rurales.
Zonas con aguas escasas	Áreas con pozos o fuentes de agua permanentes/semipermanentes, pero con limitaciones por pendiente o calidad del suelo para uso agrícola o ganadero.
Zonas sin agua	Áreas con agua solo en época de invierno o con pendientes mayores al 50%, lo que imposibilita su aprovechamiento.

Determinándose a través de una revisión de cartografía disponible, la verificación en terreno, el uso de fotografías aéreas, y la mapificación de las zonas considerando como un factor importante la pendiente.

6. **Otras variables que por sus características deben tenerse en cuenta:** Es posible tener en cuenta otras variables de acuerdo con condiciones especiales o que inciden en la determinación de los valores unitarios del terreno. Generando un mapa específico para esta Variable. Ejemplo: Riesgos geológicos representativos, amenazas naturales que inciden en la zona, reportadas por autoridades competentes.

Finalmente, las ZHF Rurales serán determinadas mediante la integración de todas las variables analizadas, combinándolas de manera conjunta para generar grupos únicos que definirán las zonas finales del municipio de Monguí.

Dentro de los algoritmos de inteligencia artificial, y en consideración de las variables físicas necesarias para la constitución de ZHF Rurales, los algoritmos de Machine Learning y Deep Learning han demostrado aptitudes para el reconocimiento de variables pertinentes, en particular. El algoritmo Deep Learning de CNN presenta resultados precisos a través de diferentes estudios de caso para la detección de vías (Xia et al., 2019) (Atala et al., 2021) (Henry et al., 2018) (Abdullahi et al., 2020), directamente relacionada con la variable establecida según la metodología IGAC (2021) de Influencia de las vías.

En lo que respecta a los algoritmos de Machine Learning, las SVM han demostrado aptitudes para la detección de cuerpos de agua y coberturas y uso del suelo (Bangira et al., 2019) (Yagmuer et al., 2019) (Misra et al., 2018) (Mountrakis et al., 2011) (Talukdar et al., 2020).

Con esto, ambos algoritmos se presentan como referentes pertinentes para la implementación de inteligencia artificial para la generación de ZHF Rurales, que sean pertinentes para el proceso de actualización catastral en el municipio de Monguí.

Zhang et al. (2019) definen las CNN como un tipo red neuronal artificial diseñada para reconocer patrones, aplicada por lo general a la clasificación de imágenes. Posee dos componentes principales: las capas convolucionales y las capas de pooling. Las capas convolucionales son el núcleo de una CNN, y su función es detectar características o patrones clave en la imagen (como bordes o texturas) aplicando filtros. Luego, estos resultados pasan por una función no lineal (como ReLU) que ayuda a la red a aprender relaciones complejas.

Las capas de pooling se encargan de reducir el tamaño de la imagen o los datos, extrayendo solo la información más importante (por ejemplo, tomando el valor máximo de una pequeña área). Esto hace que la red sea más eficiente y menos propensa a sobre ajustarse. Las CNNs finalmente utilizan todas las capas conectadas, donde se toman todas las características aprendidas, para la clasificación de imágenes y el reconocimiento de patrones complejos gracias a la combinación de estas capas especializadas.

Por otra parte, las SVM fueron presentadas formalmente por (Boser et al., 1992), y como describe Hamad (2020) se pueden definir como un método no paramétrico de aprendizaje supervisado, con fines clasificatorios, que busca generalizar y proveer predicciones razonables

para nuevos conjuntos de datos, creando un hiperplano que separa las clases. Los kernels más comúnmente utilizados en procesamiento de imágenes incluyen el polinómico, de funciones radiales y el sigmoide. Los SVM pueden trabajar con datos que se separan de manera lineal o no lineal, identificando el hiperplano óptimo que maximiza el margen entre dos categorías, por lo que también se les conoce como clasificadores de gran margen.

A diferencia de las redes neuronales (ANN), que controlan la complejidad del modelo de forma manual, los SVM determinan automáticamente la complejidad estableciendo el número de vectores de soporte. En general, se ha observado que los SVM suelen superar a las redes neuronales en tareas de reconocimiento de patrones. Finalmente, los SVM han sido seleccionados como algoritmos de aprendizaje estadístico relativamente nuevos para la clasificación de tipos de cobertura terrestre homogéneos y heterogéneos (Hamad, 2020).

En síntesis, la implementación de un catastro multipropósito actualizado, fundamentado en metodologías técnicas de inteligencia artificial y en la integración de variables físicas definidas por el IGAC, representa un avance significativo en la gestión territorial sostenible de Colombia. La alta desactualización catastral evidenciada a nivel nacional, especialmente en áreas rurales, exige el desarrollo de enfoques innovadores que combinen el uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y algoritmos de inteligencia artificial. En este contexto, las SVM y las CNN se consolidan como herramientas efectivas para la clasificación de coberturas terrestres, cuerpos de agua e infraestructura vial, ofreciendo resultados más precisos y eficientes en comparación con métodos tradicionales.

Estos avances permiten optimizar tiempos, reducir costos y garantizar datos confiables, indispensables para la correcta delimitación de las ZHF Rurales, así como para la toma de decisiones informadas en planificación y ordenamiento territorial. De esta manera, el municipio de Monguí tiene la oportunidad de convertirse en un caso ejemplar, al aprovechar las herramientas tecnológicas más avanzadas para actualizar su información catastral, contribuyendo a mejorar la seguridad jurídica, la equidad fiscal y la sostenibilidad del desarrollo territorial.

Este marco teórico demuestra que la integración de la inteligencia artificial en los procesos catastrales no solo es factible, sino que además constituye un camino necesario hacia la

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

modernización del sistema catastral en Colombia, respondiendo a las necesidades locales y alineándose con las tendencias internacionales en gestión del territorio.

6. Metodología

La metodología desarrollada en este proyecto fue diseñada para abordar de manera eficiente la actualización de las ZHF Rurales en el municipio de Monguí, Boyacá, aprovechando herramientas de inteligencia artificial y análisis geoespacial. Este enfoque responde a la necesidad de superar la desactualización catastral que afecta significativamente la planificación y gestión territorial en Colombia, especialmente en áreas rurales.

El diseño metodológico se fundamentó en el uso de algoritmos de aprendizaje automático y tecnologías geoespaciales, lo que permitió analizar variables clave como uso del suelo, disponibilidad de aguas, influencia de vías y pendientes, entre otras. La selección de herramientas tecnológicas como las SVM y las CNN ha sido estratégica, ya que estas técnicas han demostrado su efectividad en la clasificación de coberturas y detección de elementos geográficos con un alto grado de precisión.

El trabajo elaborado integró datos provenientes de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y bases de datos oficiales suministradas por entidades gubernamentales. Además, se han considerado estándares técnicos definidos por el IGAC y normativas nacionales, garantizando que los resultados obtenidos sean coherentes con los lineamientos del catastro multipropósito.

A continuación, se explican las etapas clave del proyecto, desde la recolección y procesamiento de datos hasta la implementación y validación de los algoritmos, proporcionando una base sólida para la caracterización y delimitación de las zonas homogéneas físicas rurales. Este enfoque metodológico busca no solo generar resultados técnicos confiables, sino también establecer un modelo replicable que pueda ser aplicado en otros municipios del país.

6.1 Enfoque metodológico

La definición del enfoque metodológico fue el punto de partida para estructurar la forma en que se recolectaron, analizaron e interpretaron los datos en este proyecto. Con base en las características del objetivo de investigación, se adoptó un enfoque mixto, que combina elementos cualitativos y cuantitativos, permitiendo una comprensión integral de las variables estudiadas.

El enfoque cuantitativo fue clave para procesar grandes volúmenes de datos geoespaciales provenientes de imágenes satelitales de alta resolución y modelos digitales de elevación. Este enfoque facilitó la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático, como las SVM y CNN, los cuales permitieron clasificar y analizar variables como uso del suelo, vías, disponibilidad de agua y pendientes con un alto grado de precisión. La cuantificación de los resultados se validó mediante indicadores técnicos como el coeficiente Kappa, F1 score y matrices de confusión, garantizando la calidad y fiabilidad de los resultados.

Por otro lado, el enfoque cualitativo permitió interpretar los resultados obtenidos en el contexto territorial, social y normativo del municipio de Monguí, esto incluyó la revisión de documentos oficiales, como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y las normativas del IGAC, asegurando que las ZHF Rurales delimitadas fueran coherentes con las características locales.

El enfoque mixto no solo permitió un análisis técnico riguroso, sino que también aportó una perspectiva contextual, integrando los resultados en un marco práctico y aplicable para la actualización catastral. Este enfoque integral asegura que el proyecto no solo cumpla con estándares técnicos, sino que también responda a las demandas del territorio y los actores involucrados.

6.2 Tipo de estudio

Este trabajo se desarrolla bajo un enfoque exploratorio, ya que busca la implementación de tecnologías de inteligencia artificial y herramientas geoespaciales en la actualización de ZHF Rurales y este enfoque tiene como objetivo principal identificar tendencias, analizar relaciones potenciales entre variables físicas como uso del suelo, disponibilidad de agua, pendiente e influencia de vías y evaluar cómo estas interactúan con los algoritmos utilizados, como las SVM y las CNN.

El carácter exploratorio del estudio permite aumentar el grado de familiaridad con estas metodologías tecnológicas en un escenario específico como Monguí, Boyacá, donde no se habían integrado previamente para abordar el problema de la desactualización catastral. Además, este enfoque facilita identificar las principales limitaciones, desafíos y oportunidades en el uso de estas herramientas, sentando las bases para futuros estudios más detallados y aplicados en este ámbito.

De este modo, el estudio no solo contribuye a ampliar el conocimiento sobre las tecnologías innovadoras en los procesos catastrales, sino que también proporciona un marco inicial para su implementación en otros municipios, impulsando la modernización del catastro multipropósito en el contexto colombiano.

6.3 Procedimiento

Inicialmente, se hizo la recolección de los insumos necesarios para la aplicación de la metodología de Zonas Homogéneas Físicas Rurales acorde a las variables que se tendrán en cuenta:

1. **Uso actual del suelo:** Se utilizaron imágenes satelitales de Planet Scope, de la Constelación Super Dove, con resolución espacial de 3m, capturadas diariamente para la actualización del territorio con datos correspondientes a la realidad.

Al tratarse de una variable que será cruzada con múltiples variables para la generación de las Zonas Homogéneas Físicas Rurales, es importante reconocer que, como indican Whiteside et al. (2011) la clasificación por medio de píxeles puede resultar en el efecto de manchas o “sal y pimienta” en el que las coberturas son asignadas a diferentes clases aunque pertenezcan a una única región homogénea.



Ilustración 2. Comparación de clasificaciones supervisadas basadas en píxel (izquierda) y basadas en objetos (derecha), tomado de Kelly et al. (2011)

Es evidente que para una clasificación que busca ser utilizada para una generación de polígonos asociados, una clasificación supervisada basada en objetos puede presentar mayores

niveles de precisión, con una caracterización más homogénea de las coberturas y sus respectivas clases.

Considerando entonces que se utilizará una clasificación basada en objetos, se procedió a la creación de la imagen segmentada, que permitirá la aplicación del algoritmo SVM y hará integración con las clases que posteriormente serán determinadas. Las variables a tener en cuenta para la generación de la imagen segmentada fueron:

- **Detalle espectral:** Correspondiente a la sensibilidad en la diferencia de los niveles digitales de la imagen, permitiendo una mayor capacidad para la captura de variaciones sutiles en su información espectral con su incremento. Dado que las coberturas estudiadas presentan variaciones significativas en sus comportamientos espectrales, y considerando la resolución espacial de 3m del insumo disponible junto con sus 8 bandas espectrales, se optó por un valor elevado para este factor. Esto garantiza un aprovechamiento más eficiente de la información multispectral, especialmente en bandas clave como el NIR, mejorando la capacidad de diferenciación entre las distintas coberturas.
- **Detalle espacial:** Correspondiente a la influencia en la proximidad espacial al momento de formar las segmentaciones, permitiendo la identificación de patrones más pequeños con su incremento. Debido a la resolución espacial de la imagen, y en consideración de las dificultades para poder identificar coberturas como edificaciones con un alto nivel de detalle bajo una resolución de 3m, se optó por un valor menor para este factor, de tal manera que se dé prioridad a la información espectral, y que se prioricen patrones de área en porciones de terreno más grandes, hecho importante al considerar que la cobertura es correspondiente a toda el área rural del municipio de Monguí.
- **Tamaño mínimo se segmento:** Correspondiente al tamaño mínimo permitido para la segmentación, permitiendo que regiones más pequeñas que este límite sean unidas a segmentos adyacentes. Considerando la resolución espacial de 3m, se determina importante tomar un valor menor que permita la identificación correcta de construcciones, pero que no resulte en un sobreajuste de las coberturas.

A través de un proceso iterativo de diferentes configuraciones, se determinaron los siguientes parámetros para la determinación de la segmentación:

Tabla 4. Parámetros para la segmentación de imagen

Variable	Valor
Spectral detail (detalle espectral)	18
Spatial detail (detalles espacial)	3
Minimum segment size in pixels (tamaño mínimo de segmento en pixeles)	20

Obteniendo la siguiente imagen resultado:

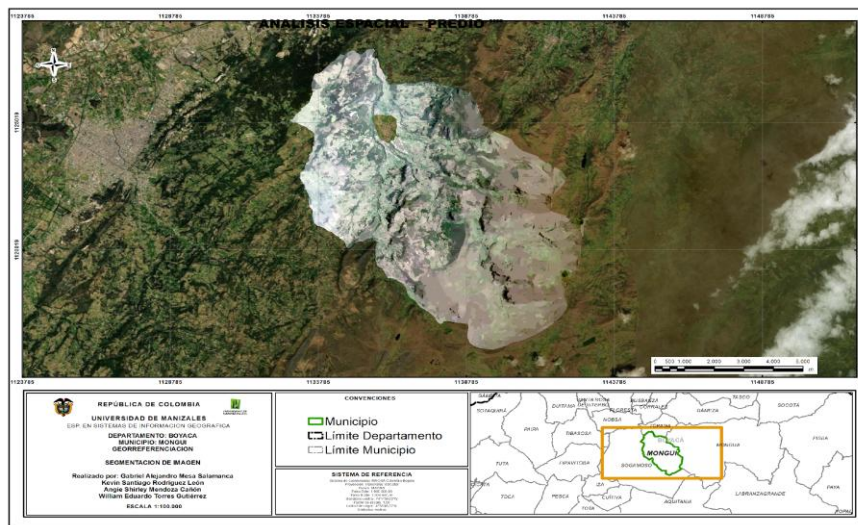


Ilustración 3. Segmentación de imagen para la clasificación supervisada por objetos

Una vez obtenida la segmentación y verificando el comportamiento de las diferentes coberturas, se desarrolló la estructuración de las clases a utilizar, conforme a la metodología IGAC, y comprendiendo las limitaciones de la segmentación y clasificación de coberturas acorde a la escala y resolución del proyecto, se determinaron 6 categorías finales para la clasificación del uso actual del suelo:

Tabla 5. Categorías de uso actual del suelo utilizadas

Código	Variable
1	Bosques
2	Edificios y otras construcciones
4	Mixto
5	Pastos y cultivos

Con estas variables, se procedió a la creación de los polígonos de entrenamiento, asegurándose de que se tuviera una diferenciación adecuada entre las clases y acorde a la segmentación obtenida. Aquí es importante destacar que se generó una clase intermedia de vía, toda vez que para la clase de construcción se presentaba un sobreajuste respecto a ambas coberturas, haciendo difícil su diferenciación. Al ser las vías una variable no establecida en las categorías originales definidas por el IGAC, al finalizar la clasificación se suprime dicha clase, de manera manual y verificando el comportamiento general de las coberturas a su alrededor previo al ajuste.

Así, se obtiene finalmente la clasificación supervisada por medio del algoritmo SVM para el uso actual del suelo:

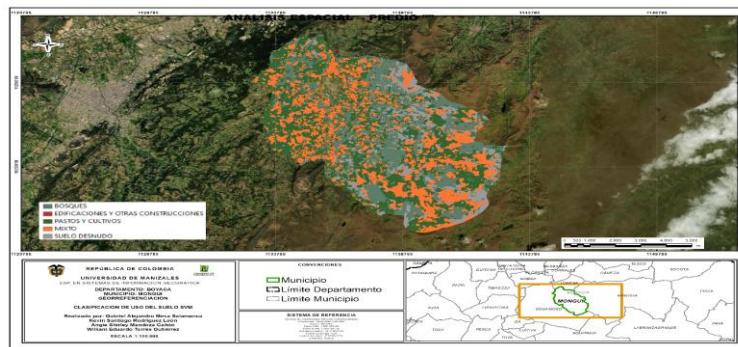


Ilustración 4. Resultado clasificación de uso actual del suelo por el algoritmo SVM

Una vez obtenida la clasificación supervisada basada en el algoritmo SVM para el uso actual del suelo, se procedió a realizar un proceso de suavizado y limpieza para garantizar la calidad del resultado previo a su conversión en polígonos. Este paso es fundamental para evitar la generación de artefactos y polígonos excesivamente fragmentados que puedan complicar el análisis subsecuente de las ZHF Rurales. Para ello, se aplicaron las siguientes herramientas de ArcGIS Pro de manera secuencial:

1. **Majority Filter:** Este paso tiene como objetivo reducir el ruido en la clasificación resultante, eliminando píxeles aislados que no pertenecen a la misma categoría que sus vecinos inmediatos. El filtro utiliza una vecindad de 8 celdas para reemplazar los valores de píxeles minoritarios con el valor predominante en su entorno. Esto permite suavizar los bordes y unificar áreas

homogéneas, garantizando que las clases finales sean más coherentes espacialmente.

2. **Boundary Clean:** Posteriormente, se utilizó la herramienta de limpieza de bordes (**Boundary Clean**) para suavizar las transiciones entre clases contiguas, eliminando bordes dentados o irregulares que suelen aparecer tras la clasificación. Este paso prioriza la claridad de las divisiones entre las diferentes clases y asegura que las fronteras sean más definidas y estéticamente consistentes.
3. **Region Group:** Una vez limpios los bordes, se aplicó la herramienta de agrupamiento de regiones (**Region Group**) para asignar identificadores únicos a las áreas conectadas que comparten la misma clase. Este paso permite identificar regiones continuas y facilita la posterior eliminación de regiones pequeñas o no deseadas. Es importante resaltar que esta herramienta reemplaza los valores originales de las clases con un identificador único por región. Por ello, fue necesario un paso posterior de "recombinación" para preservar los valores de clasificación originales en el resultado final.

Obteniendo así la nueva imagen clasificada para la generación de polígonos:

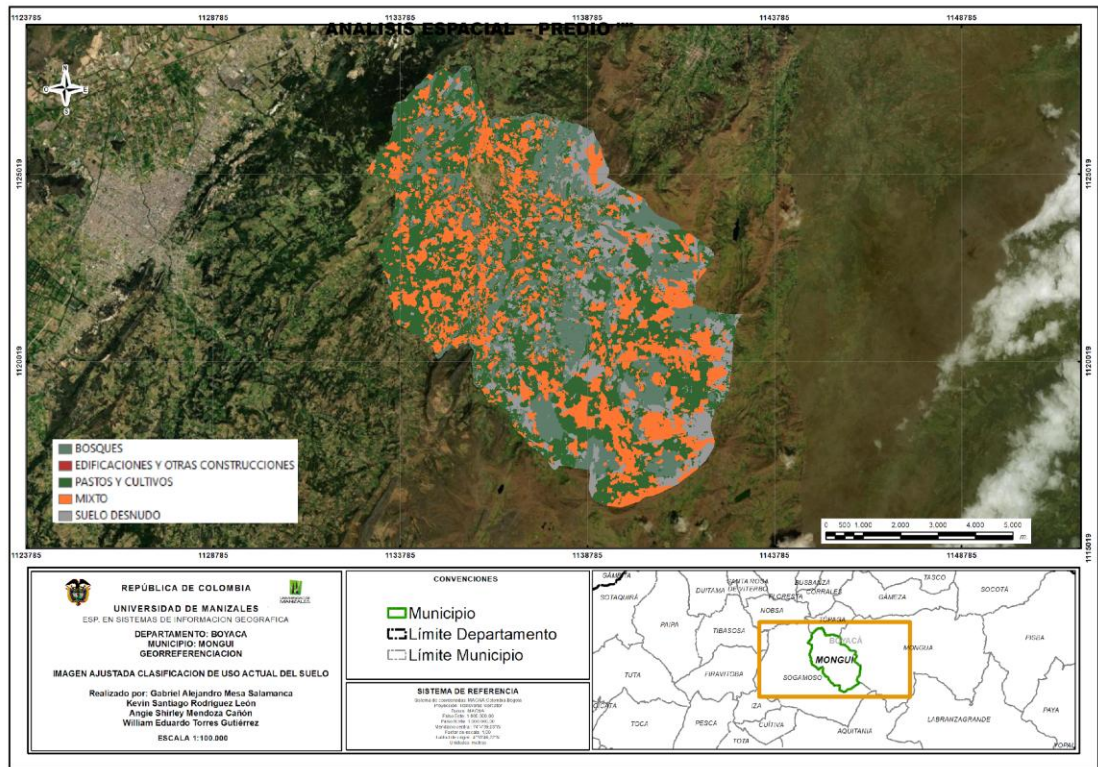


Ilustración 5. Resultado suavizamiento de la clasificación SVM

Este proceso permitió mejorar significativamente la calidad de la clasificación, reduciendo la fragmentación de las áreas y garantizando una representación más consistente de las clases. Además, estos pasos facilitaron la generación de polígonos representativos para cada clase, que servirían como base para las ZHF.

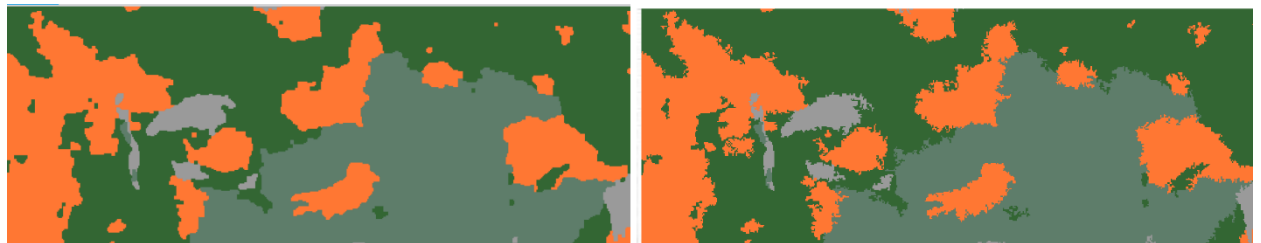


Ilustración 6. Resultado del suavizamiento de la clasificación resultante (izquierda) y el resultado preliminar (derecha)

Finalmente, el resultado suavizado se preparó para la conversión a polígonos mediante la herramienta **Raster to Polygon**, garantizando que los atributos originales de las clases se mantuvieran en el producto final. Este flujo de trabajo asegura que los polígonos generados no

solo sean homogéneos y fáciles de analizar, sino que también mantengan toda la información original necesaria para los análisis posteriores.

2.AHT y pendientes: Se refiere a la delimitación de áreas con características similares en términos de productividad y condiciones del suelo. La recolección de esta información se realizó directamente en la página de la Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, con base en los datos que resultan de las investigaciones que se realizan concernientes a las características de los suelos, su clasificación y sus límites, los presentan sobre un mapa para ser interpretados desde una perspectiva de aptitud, usos y vocación del territorio, generando como producto la capa de Áreas Homogéneas de Tierra.

La variable asociada a la pendiente no se analiza de manera independiente, ya que está implícita dentro de las Áreas Homogéneas de Tierra. Sin embargo, su estudio separado resulta fundamental, ya que proporciona información de soporte para la obtención de otras variables necesarias en el presente caso de estudio en el municipio de Monguí, Boyacá.

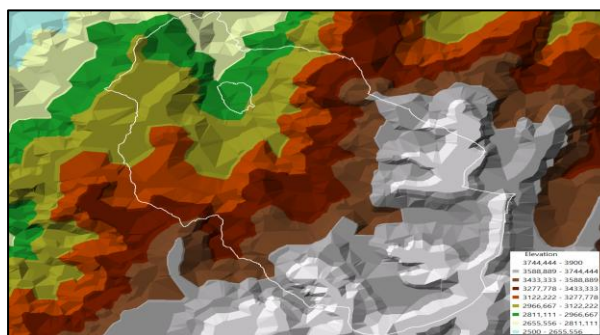


Ilustración 7. TIN de Monguí

Para obtener la pendiente, se utilizó el software ArcGIS y se generó un DEM. El proceso comenzó con la creación de un TIN (Triangulated Irregular Network – Red de Irregular de Triángulos), un modelo vectorial que representa superficies tridimensionales mediante una malla de triángulos generados a partir de puntos con coordenadas. Las curvas de nivel necesarias para construir el TIN se descargaron del geoportal del IGAC, que ofrece cartografía base a nivel nacional.

Se delimitó un rectángulo que cubría la zona de análisis (Monguí, Boyacá), y se recortaron las curvas de nivel correspondientes para optimizar el procesamiento de información y crear un TIN específico para el área de interés. Posteriormente, utilizando la herramienta TIN TO

RASTER, se generó el DEM, una representación digital de la altitud del terreno. El DEM obtenido permitió identificar una cota mínima de 2,500 msnm y una cota máxima de 3,900 msnm.

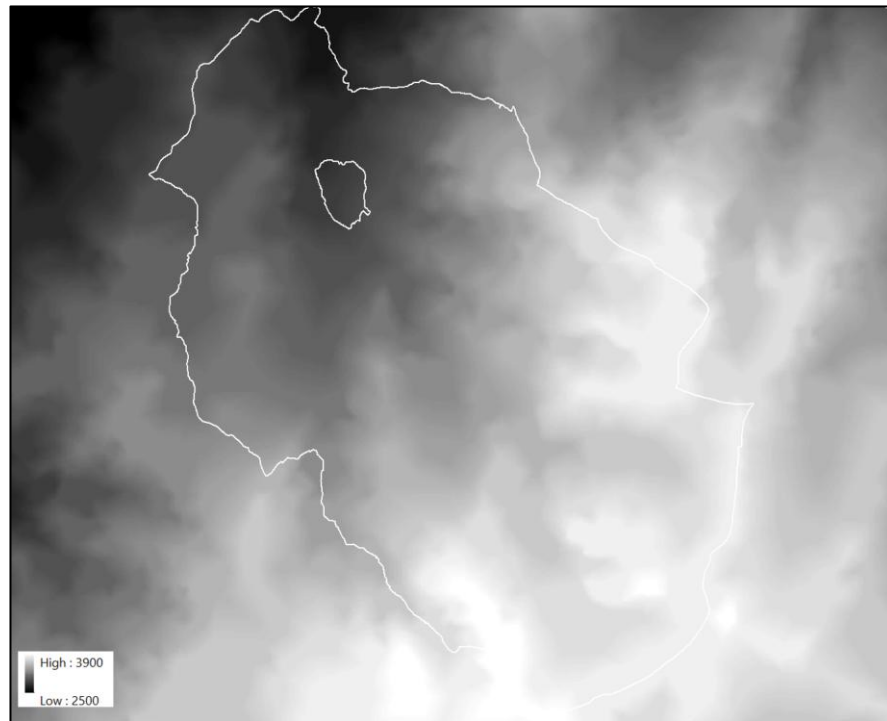


Ilustración 8. DEM generado a partir de curvas de nivel

Para evidenciar la calidad de la información obtenida a partir de las curvas de nivel, se emplearon recursos adicionales del portal Earthdata de la NASA. Esta plataforma provee datos topográficos obtenidos por sensores satelitales, como el ALOS PALSAR, que genera DEM mediante tecnología radar. Este método es particularmente útil en áreas de densa vegetación, ya que garantiza una precisión aceptable en la captura de datos topográficos.

Los datos raster obtenidos de Earthdata cubrían áreas extensas, por lo que se realizó un recorte con un polígono que delimita el municipio de Monguí. Este análisis reveló una cota mínima de 2,501 msnm y una máxima de 4,004 msnm, valores que corroboraron la correspondencia entre la información generada a partir de las curvas de nivel y los datos satelitales.

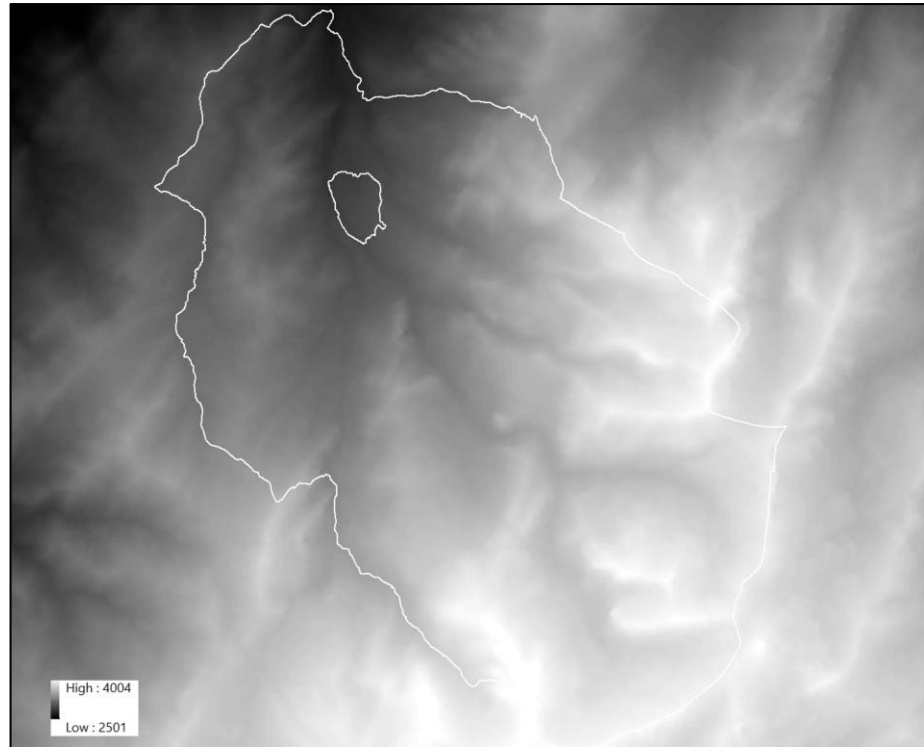


Ilustración 9, DEM ALOS PALSAR

Utilizando el DEM como insumo, se generó un mapa de pendientes mediante la herramienta SLOPE de ArcGIS. Este procedimiento produce un raster en el que cada celda representa el valor de la pendiente en un punto específico. Las pendientes se clasificaron siguiendo las categorías definidas por el IGAC:

- Plano (0–3%)
- Ligeramente plano (3–7%)
- Ligeramente inclinado (7–12%)
- Fuertemente ondulado (12–25%)
- Fuertemente quebrado (25–50%)
- Escarpado (50–75%)
- Muy escarpado (>75%)

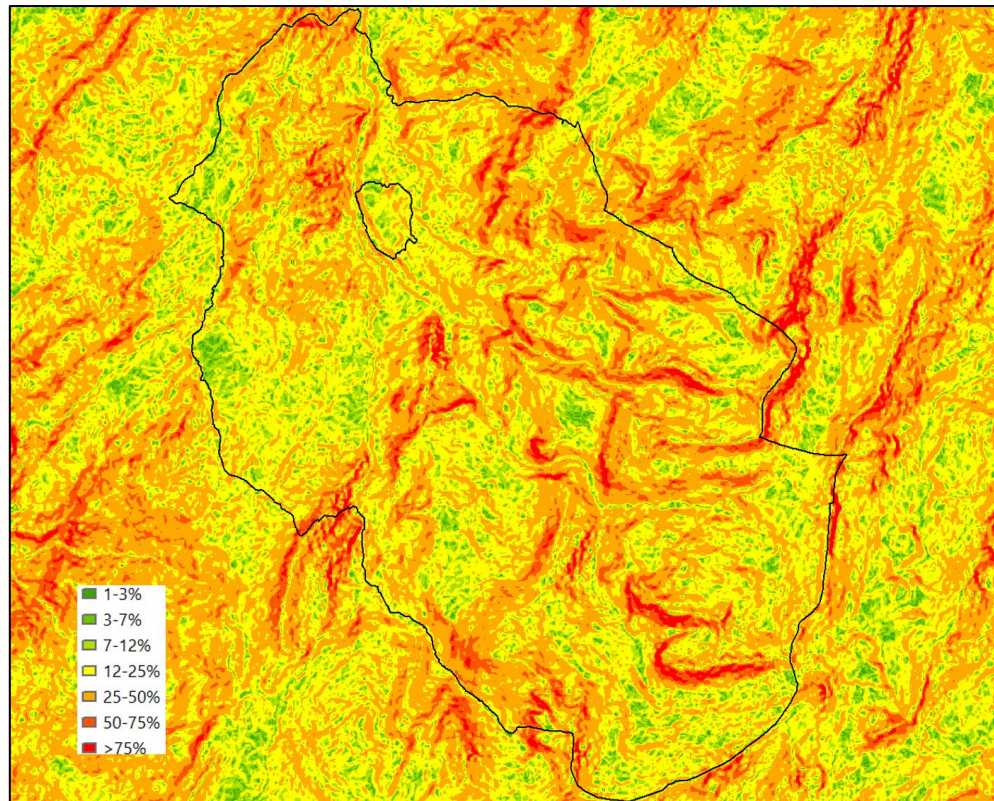


Ilustración 10. Raster Slope

Si bien los análisis iniciales se realizan con datos raster, para facilitar estudios más detallados se convirtió la información a datos vectoriales mediante la herramienta Raster to Polygon. Este proceso generó una capa con múltiples polígonos pequeños. Para simplificar los datos y hacerlos más manejables, se estableció como unidad mínima cartografiada un área de 40000 m² (4 hectáreas). Los polígonos menores a esta área se generalizaron y fusionaron con polígonos vecinos más grandes mediante la herramienta Eliminate. Este paso permitió obtener una representación más simplificada y adecuada para el análisis espacial requerido en cuanto a pendientes.

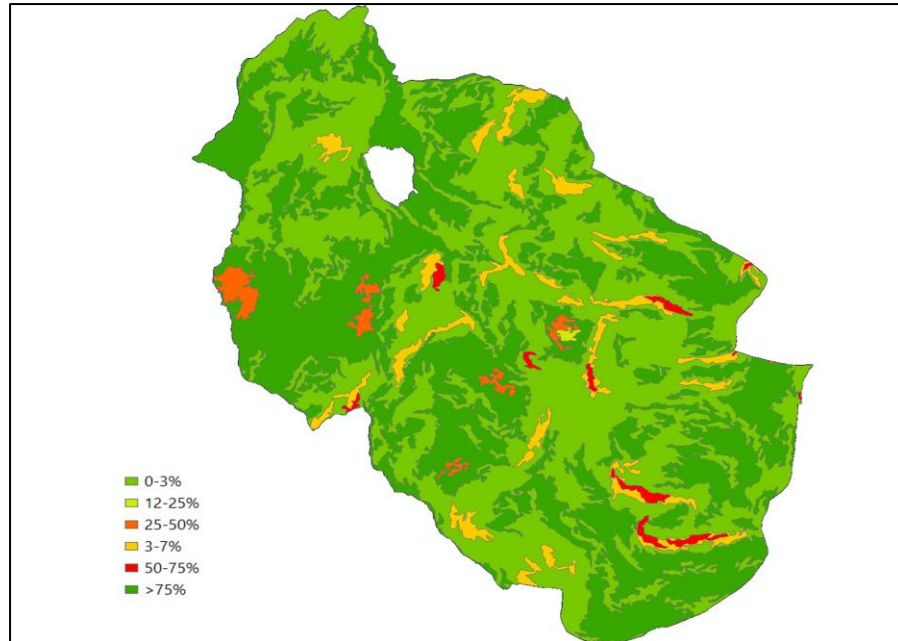


Ilustración 11, Mapa de pendientes

2. **Influencia de vías:** Para la identificación de vías dentro del área de estudio, se utilizó un algoritmo basado en CNN implementado en ArcGIS Pro. Este enfoque permitió generar un insumo preliminar que identifica la presencia de vías en la zona rural del municipio. Sin embargo, debido a factores como la presencia de árboles, vegetación densa y otras obstrucciones que dificultan la detección completa de las vías, este resultado inicial se consideró como una base preliminar para el análisis.

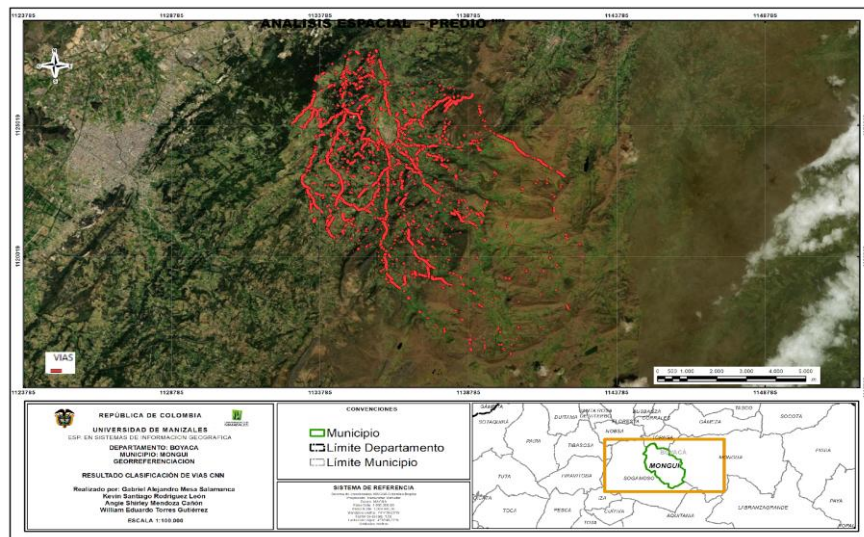


Ilustración 12. Resultado algoritmo de vías CNN

Posteriormente, el insumo preliminar fue ajustado manualmente utilizando la imagen satelital de alta resolución, con el fin de corregir y completar segmentos de vías que no fueron identificados correctamente por el algoritmo. Este proceso incluyó:

1. **Validación visual:** Verificar la correspondencia entre las vías detectadas y las características visibles en la imagen satelital.
2. **Correcciones manuales:** Incorporar segmentos de vías faltantes o modificar trazados incorrectos basándose en información de la imagen satelital y en imágenes de apoyo disponibles en fuentes en línea.

Una vez ajustadas y verificadas, las vías obtenidas fueron clasificadas según las categorías establecidas por la metodología del IGAC, obteniendo así las vías correctamente clasificadas y definidas:

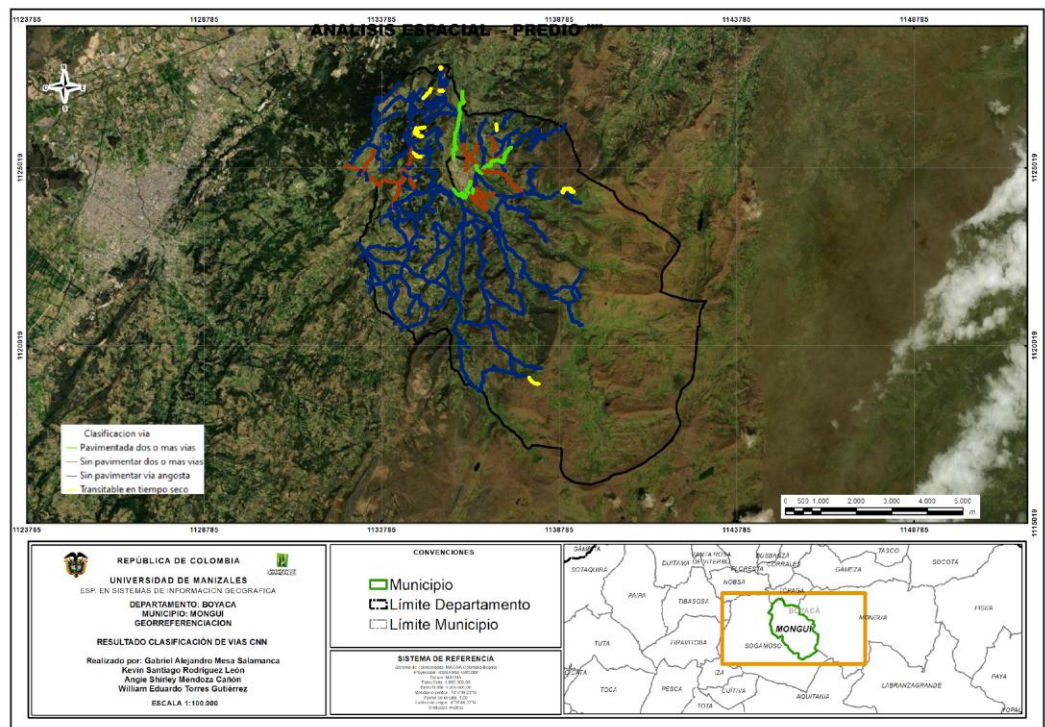


Ilustración 13. Resultado ajuste clasificación de vías CNN

Finalmente, se realizó un análisis de la influencia de las vías respecto a la malla predial del municipio, identificando su proximidad y accesibilidad en relación con las parcelas del área de estudio. Este análisis permitió determinar la categoría de influencia de cada vía y su impacto en la

conectividad y accesibilidad del territorio. El resultado final se presenta en una capa, mediante una salida gráfica donde se visualizan tanto las vías ajustadas como su clasificación e influencia sobre la malla predial, proporcionando un insumo clave para la generación de las ZHF Rurales.

3. Norma de uso del suelo: El municipio de Monguí adoptó el Esquema de Ordenamiento Territorial mediante el Acuerdo 007 del 21 de abril de 2004. Dentro de este esquema, se revisó específicamente el capítulo que aborda el componente rural. En el artículo 108, se delimitan y describen las zonas, junto con sus respectivos usos principales, usos compatibles, usos condicionados y usos prohibidos. Las zonas identificadas son las siguientes:

- Páramo y Subpáramo.
- Áreas periféricas a nacimientos, cauces de ríos, quebradas, pantanos y humedales.
- Áreas de infiltración y recarga de acuíferos
- Áreas forestales protectoras productoras
- Áreas forestales protectoras
- Áreas de protección de las cuencas aferentes a los acueductos municipales
- Áreas de producción agropecuaria tradicional
- Áreas de uso agropecuario semi mecanizado y semi intensivo
- Áreas de restauración morfológica y rehabilitación
- Áreas de conservación de suelos y restauración ecológica
- Áreas susceptibles de actividades mineras
- Áreas de recreación ecoturística
- Áreas históricas, culturales y de protección del paisaje
- Área suburbana

Con esta clasificación de uso del suelo establecida en el acuerdo del esquema de ordenamiento territorial, se procedió a buscar el plano que evidenciara la cartografía con las zonas delimitadas. Se determinó que el mapa pertinente era el denominado "Uso recomendado del suelo".

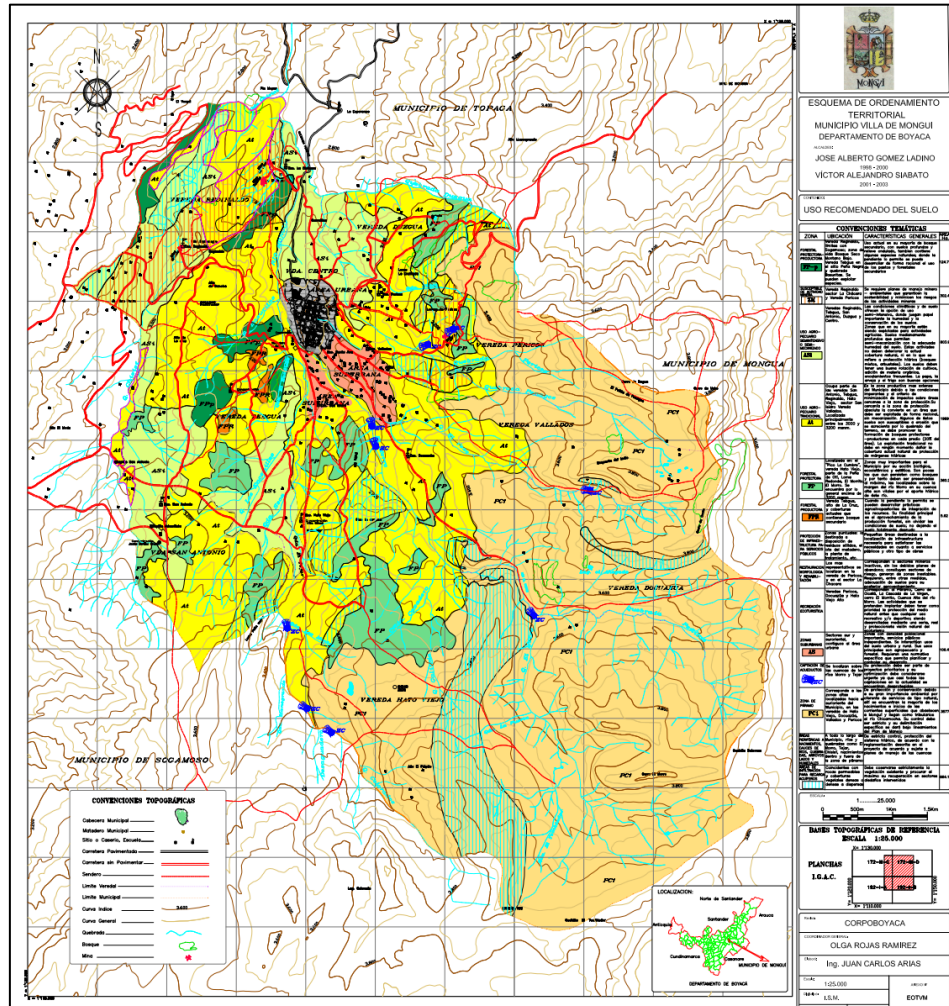


Ilustración 14. Cartografía Norma de Uso del Suelo de Monguí

La información documental y cartográfica se obtuvo del sitio web de la Gobernación de Boyacá, donde se encontraba disponible en formato PDF. Dado que esta información contaba con más de 20 años de antigüedad, no se disponía de formatos más actuales, como geodatabases (GDB) o shapefiles. Por esta razón, se decidió realizar la conversión del plano desde PDF a formato TIFF utilizando el software ArcGIS.

El primer paso consistió en la georreferenciación del plano. Este contenía dos coordenadas en la grilla: una en la parte inferior izquierda y otra en la parte superior izquierda. Ambas estaban asociadas al sistema de referencia Magna Colombia Bogotá. Al completar la georreferenciación,

se generó una imagen TIFF correctamente ubicada geográficamente, que correspondía efectivamente al municipio de Monguí.

Una vez georreferenciado el plano, se procedió a digitalizar los diferentes usos del suelo. Este proceso permitió generar un archivo espacial de tipo shapefile, que ahora es posible analizar, contrastar y utilizar para diversos fines. En particular, este archivo será importante para el análisis espacial deseado, facilitado por el software en desarrollo.

- 4. Disponibilidad de aguas superficiales permanentes:** El análisis de esta variable utilizó como insumo principal un DEM, el cual permitió desarrollar los procesos clave para identificar automáticamente las cuencas hidrográficas del municipio de Monguí, Boyacá. Posteriormente, los resultados fueron validados mediante el análisis de la imagen satelital de Planet Scope. Estas operaciones se llevaron a cabo utilizando el software ArcGIS Pro

El primer paso fue utilizar la herramienta Flow Direction, que calcula la dirección del flujo del agua desde cada celda del DEM hacia las celdas vecinas, tomando como referencia la pendiente más pronunciada. Este resultado generó un raster que representa la dirección en que fluye el agua en el terreno.

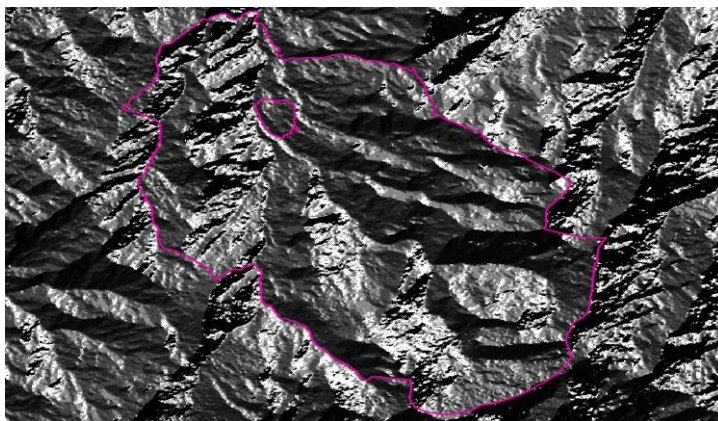


Ilustración 15. Flow direction – Arcgis Pro

A partir del raster generado con Flow Direction, se empleó la herramienta Flow Accumulation, que permite calcular cuánta agua se acumularía en cada punto del terreno si el flujo siguiera las pendientes naturales. Este análisis identifica las áreas de mayor acumulación de agua y los principales flujos hídricos.



Ilustración 16. Flow accumulation – Arcgis Pro

Por defecto, el resultado de esta herramienta genera un raster con solo dos clases visibles, lo que permite identificar los principales cuerpos de agua. Sin embargo, para representar con mayor detalle los drenajes secundarios, se utilizó la herramienta Reclassify, asignando cinco clases. Este proceso proporciona un mapa más detallado y con mayor cantidad de drenajes visibles.

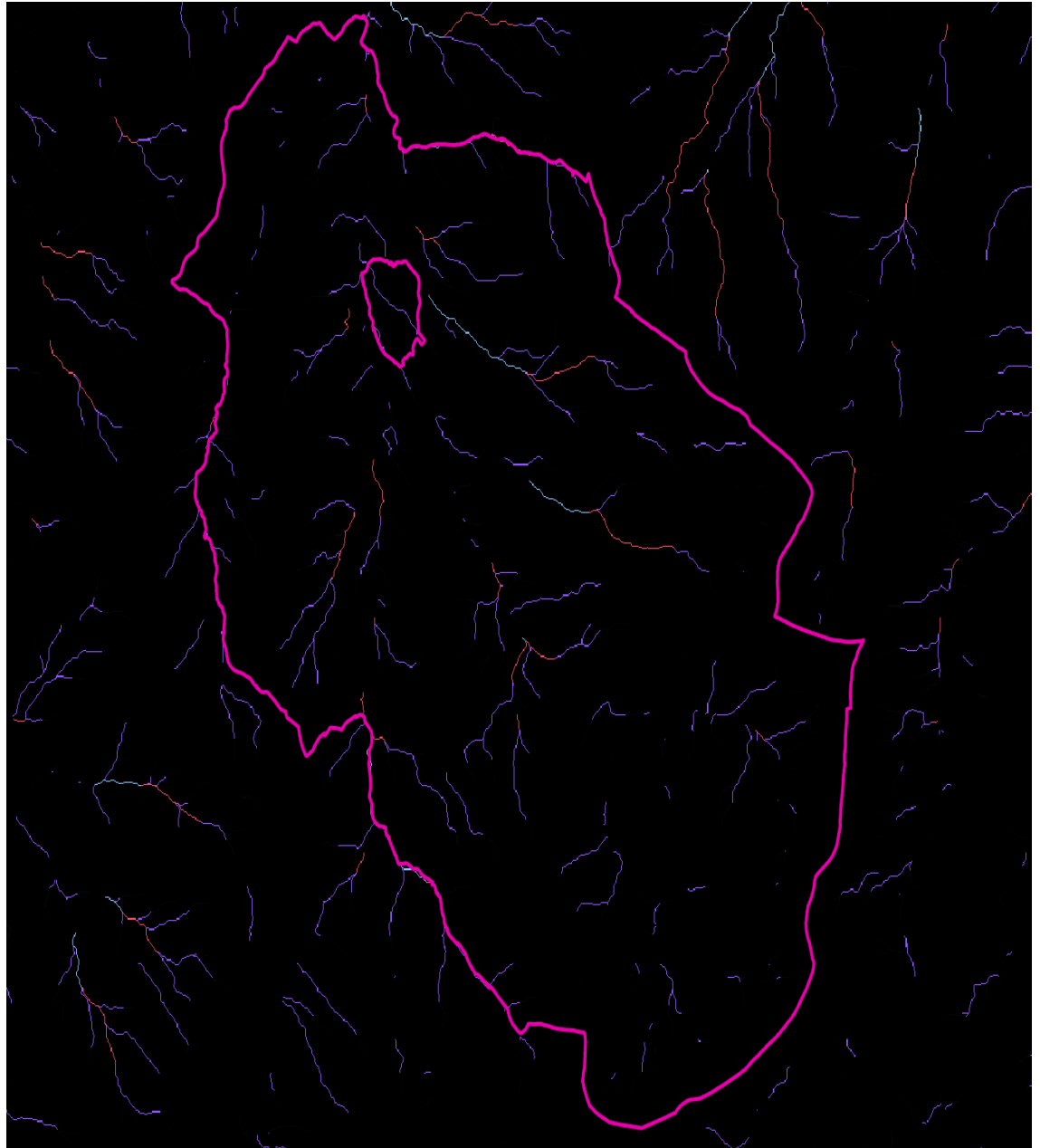


Ilustración 17. Reclasificación en 5 Clases para drenajes

Estos análisis facilitan la comprensión del flujo y la acumulación de agua en el terreno, permitiendo identificar tanto drenajes principales como secundarios. Además, se complementaron los resultados con técnicas de fotointerpretación, empleando imágenes satelitales y fotografías aéreas. La combinación de estas técnicas permitió generar una capa consolidada que incluye todos los drenajes detectados.

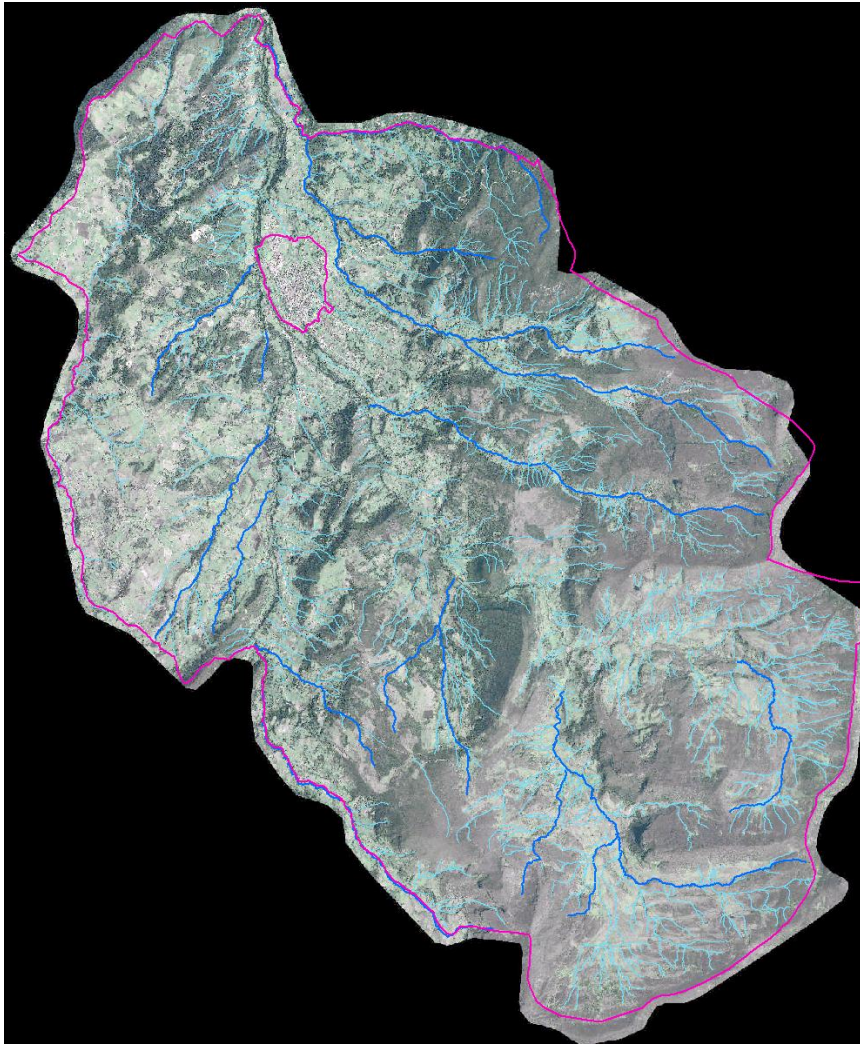


Ilustración 18. Drenajes sencillos obtenidos

7. Resultados

7.1 Uso del Suelo

Una vez obtenida la clasificación supervisada orientada a objetos con el algoritmo SVM, se procedió a validar el desempeño del modelo utilizando una matriz de confusión.

Tabla 6. Evaluación de la precisión de la clasificación supervisada con el algoritmo SVM

ID	ClassValue	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	Total	U_Accuracy	Kappa
1	BOSQUE	173	0	4	1	14	192	0,901041667	0
2	CONSTRUCCIONES	0	39	7	2	0	48	0,8125	0
3	PASTOS Y CULTIVOS	5	0	74	16	3	98	0,755102041	0
4	MIXTO	3	0	19	75	1	98	0,765306122	0
5	SUELO DESNUDO	0	0	8	7	50	65	0,769230769	0
6	Total	181	39	112	101	68	501	0	0
7	P_Accuracy	0,955801	1	0,660714	0,742574	0,735294	0	0,820359281	0
8	Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0,761533

El coeficiente Kappa, que mide la concordancia entre lo clasificado por el modelo y la realidad observada más allá del azar, arrojó un valor de 0.76, lo cual representa una concordancia sustancial (Hocking, 1976). Las categorías de bosque y construcciones demostraron un desempeño destacado, con menor cantidad de falsos positivos y valores de precisión superiores al 80%. Las categorías de pastos y cultivos, mixto y suelo desnudo presentaron precisiones superiores al 70%, lo que valida la efectividad del modelo para clasificar coberturas diversas.

Posteriormente, se realizó la transición de los resultados a polígonos. Inicialmente, se evidenció un total de 8,342 polígonos, muchos de los cuales correspondían a áreas pequeñas (<5000 m²) que introducían ruido significativo en los datos finales. Para mitigar este problema, se implementó un proceso de análisis de vecindad y simplificación, en el que los polígonos pequeños fueron absorbidos por las clases adyacentes con mayor área, excluyendo las construcciones debido a su naturaleza compacta. Este enfoque permitió reducir 7,221 polígonos, lo que resultó en un total de polígonos más homogéneos y representativos.

Continuando con el proceso de simplificación y comprendiendo que es necesario para no generar un número exagerado de ZHF Rurales finales, se realiza nuevamente otro ajuste de tal

manera que la unidad mínima cartografiable correspondas a 4 hectáreas, obteniendo así la variable de uso actual del suelo final:

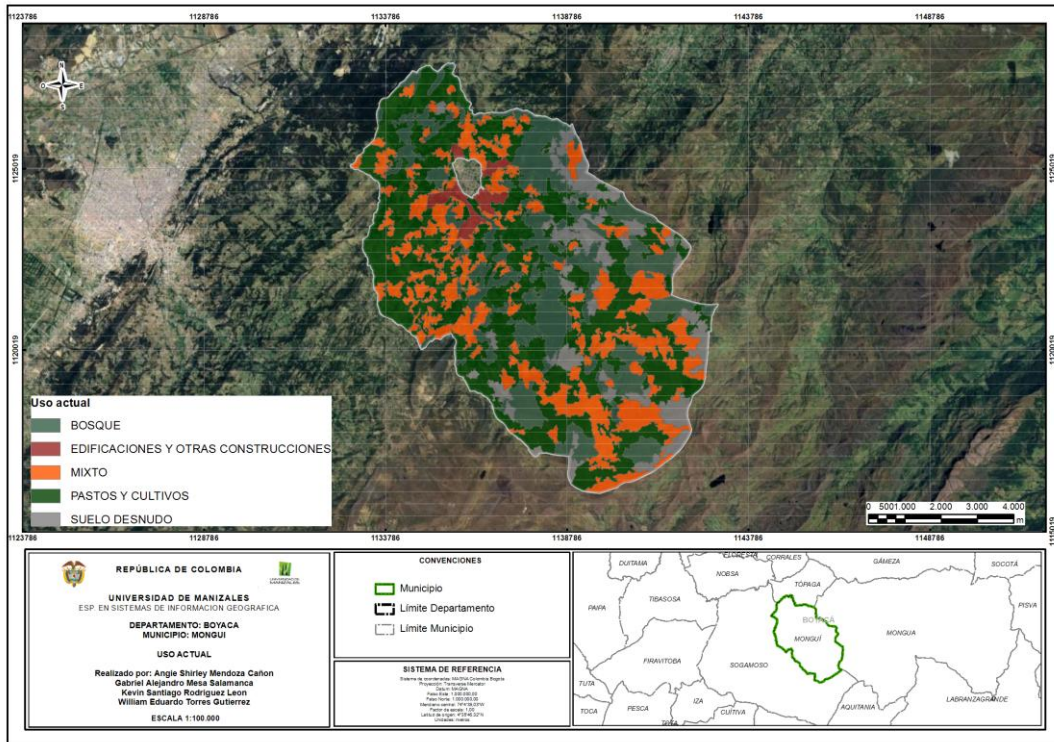


Ilustración 19. Variable final Uso Actual del Suelo

7.2 Influencias de las vías

Una vez extraídas las vías a través del algoritmo CNN, y previo a la obtención de la variable final, se realiza una validación de los resultados, obteniendo el siguiente ajuste:

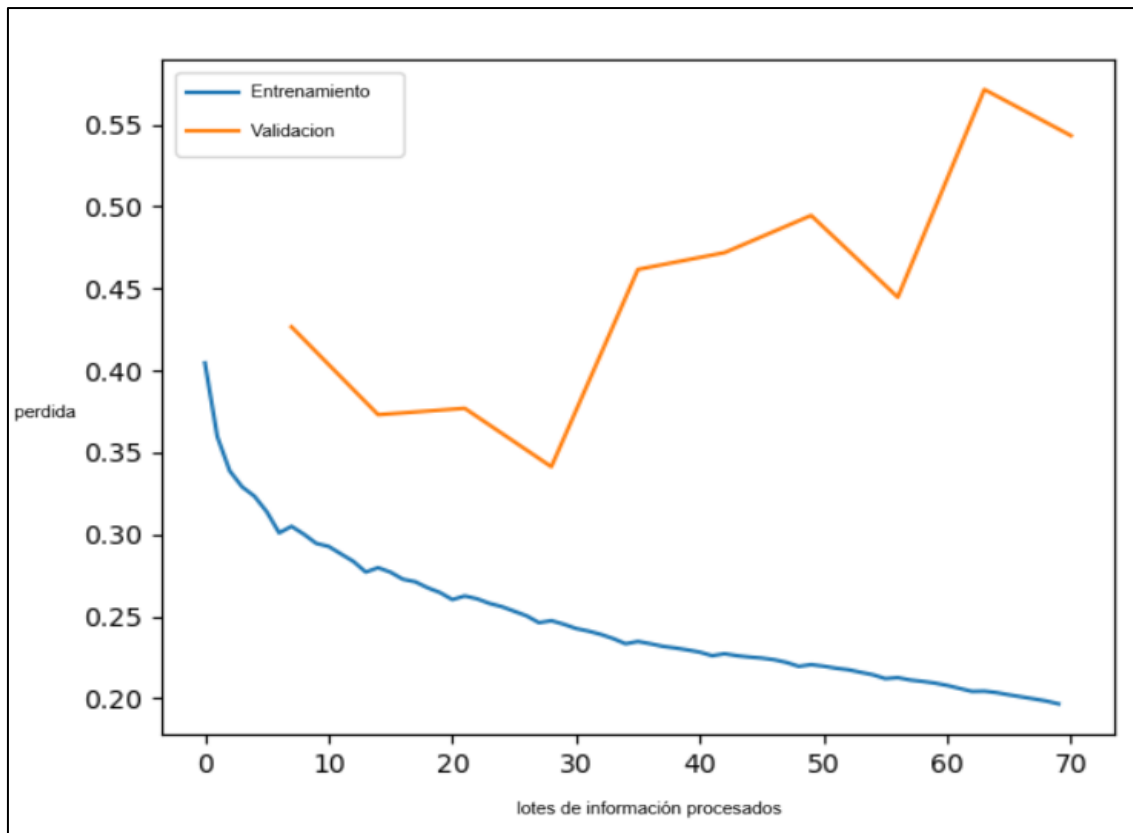


Ilustración 20. Comportamiento del algoritmo CNN para la identificación de vías

Como se puede observar, los datos de entrenamiento presentan un ajuste con tendencia a la retención de la información a medida que corre el algoritmo. Sin embargo, la pérdida en la validación tiende a aumentar después de un cierto punto, lo que indica un posible sobreajuste. Esta tendencia puede resultar en la identificación de vías más fragmentadas y una segmentación menos precisa en los datos de prueba. No obstante, esto es de esperar, considerando la escala y cobertura de la información. Existen fragmentos de vías que son naturalmente difíciles de identificar debido a la falta de visualización en la imagen satelital, así como la existencia de vías no pavimentadas con diferentes materiales, lo que añade un nuevo grado de dificultad a esta identificación.

También, a través del análisis del modelo, se obtuvo un valor de mIoU (Mean Intersection over Union, o media de intersección sobre unión) de 0.62. Este indicador mide la superposición entre las áreas clasificadas por el modelo y la realidad observada, y es ampliamente utilizado en tareas de segmentación. La relación entre el mIoU y el puntaje F1 se expresa mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 1. Determinación del puntaje F1 a partir del mIoU

$$F1 = \frac{2IoU}{1 + IoU}$$

Teniendo así un puntaje F1 aproximado de 0.76. Respecto al promedio de precisión en la segmentación, representado por un mIoU de 0.62, este valor indica una capacidad moderada del modelo para segmentar correctamente las vías. Este desempeño es aceptable considerando las dificultades propias del área de estudio, como la presencia de vegetación densa, caminos no pavimentados y trazados poco definidos.

El F1 Score es una métrica fundamental en modelos de clasificación y segmentación, ya que representa el equilibrio entre la precisión (porcentaje de predicciones correctas entre los casos detectados) y la recuperación (porcentaje de elementos reales correctamente detectados por el modelo). Un puntaje F1 de 0.76 indica que el modelo logró mantener una relación adecuada entre ambos factores, reduciendo significativamente los errores tipo I (falsos positivos) y tipo II (falsos negativos). Esta armonía entre precisión y sensibilidad permite una detección confiable de vías, incluso en condiciones adversas. Si bien existe margen para mejorar el rendimiento, se puede considerar una precisión suficiente para el análisis y aplicaciones de sensores remotos con fines prediales (Yu et al., 2024) (Sertel et al., 2024).

Una vez validado el rendimiento del algoritmo y realizado el ajuste de los resultados obtenidos con base en una revisión de la imagen satelital Planet utilizada en los demás procesos, de cartografía base e información vigente relacionada, se determina la variable de influencia de la vía a partir de un análisis espacial de la malla predial y su influencia en predios delimitados catastralmente, obteniendo así la variable de influencia de la vía.

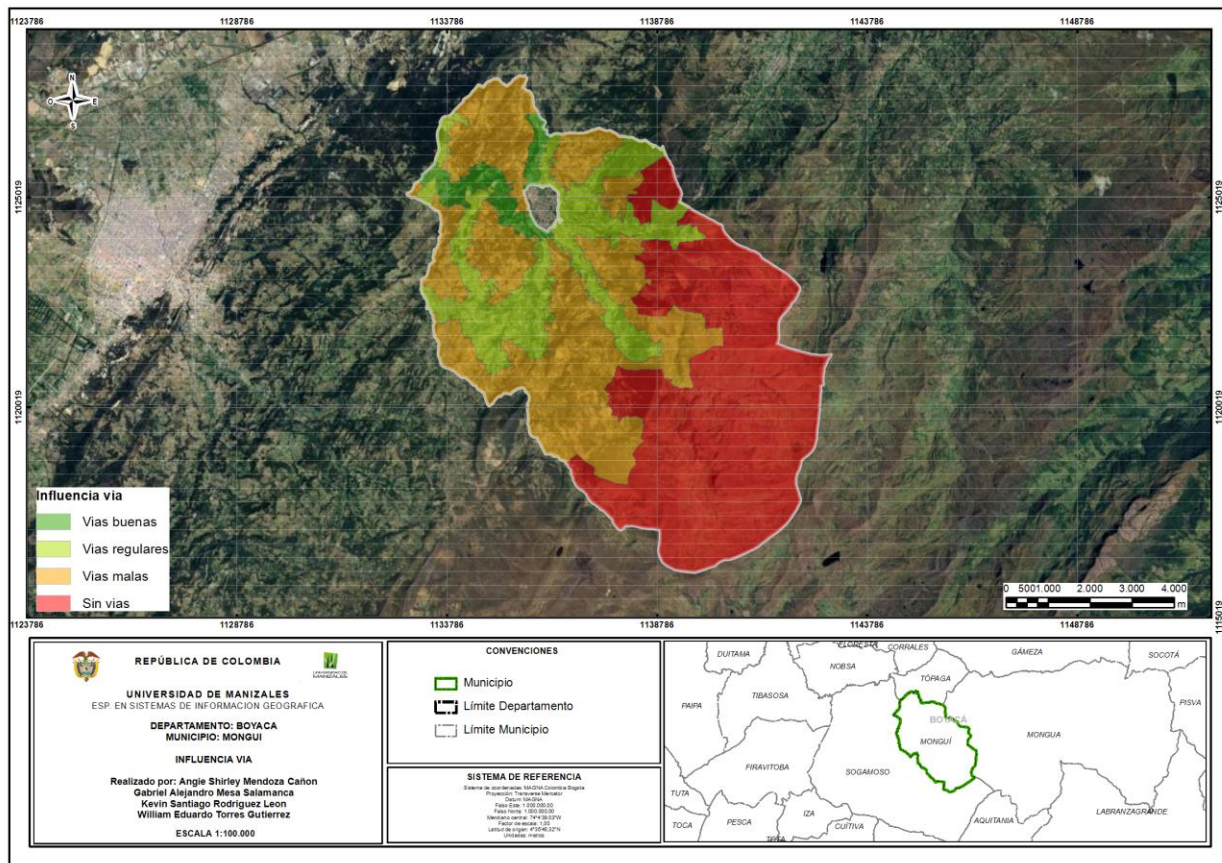


Ilustración 21. Variable final Influencia Vial

7.3 Norma de Uso del Suelo

A partir de la revisión del EOT del municipio de Monguí, específicamente del capítulo sobre el componente rural, se logró digitalizar y georreferenciar la cartografía correspondiente al "Uso recomendado del suelo". Este proceso permitió convertir el plano original en formato PDF a un archivo TIFF georreferenciado, utilizando el sistema de referencia Magna Colombia Bogotá, lo que aseguró su correcta ubicación espacial.

Posteriormente, se digitalizaron las diferentes zonas de uso del suelo establecidas en el Artículo 108 del EOT, generando así la variable de norma de uso del suelo que clasifica y delimita espacialmente áreas como páramos, zonas de recarga hídrica, áreas agropecuarias, forestales y de conservación, entre otras. Este archivo representa un insumo valioso para el análisis y gestión del territorio, ya que consolida información previamente dispersa en un formato fácilmente utilizable en sistemas de información geográfica.

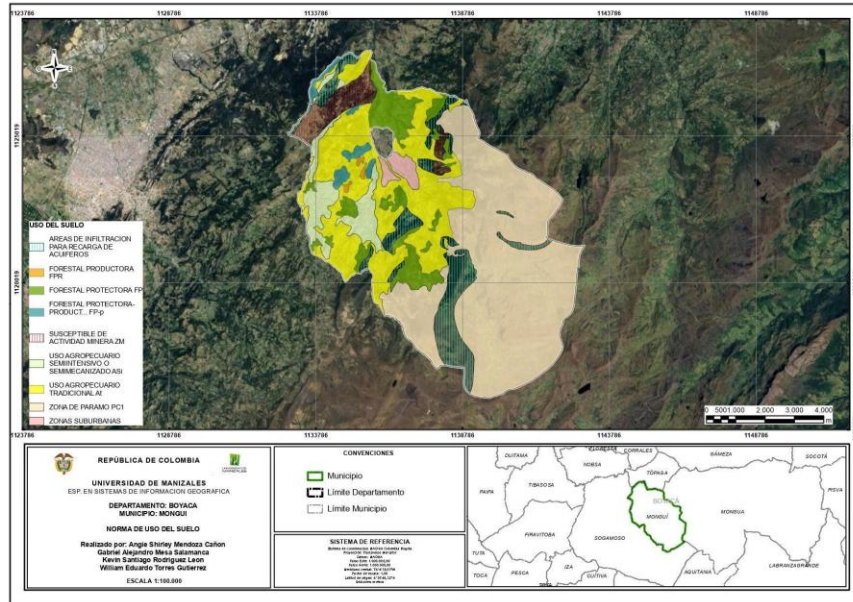


Ilustración 22. Variable final Norma de uso del suelo

7.4 Áreas Homogéneas De Tierra Y Pendientes

A partir de la información proporcionada por el IGAC, se identificaron las AHT en el municipio de Mongu. Estas áreas reflejan una clasificación detallada del territorio basada en características de suelo, aptitudes productivas y vocación de uso, ofreciendo una base sólida para la planificación y gestión territorial. La digitalización de esta información permitió consolidar una capa geoespacial actualizada, que facilita el análisis y la interpretación desde un enfoque territorial.

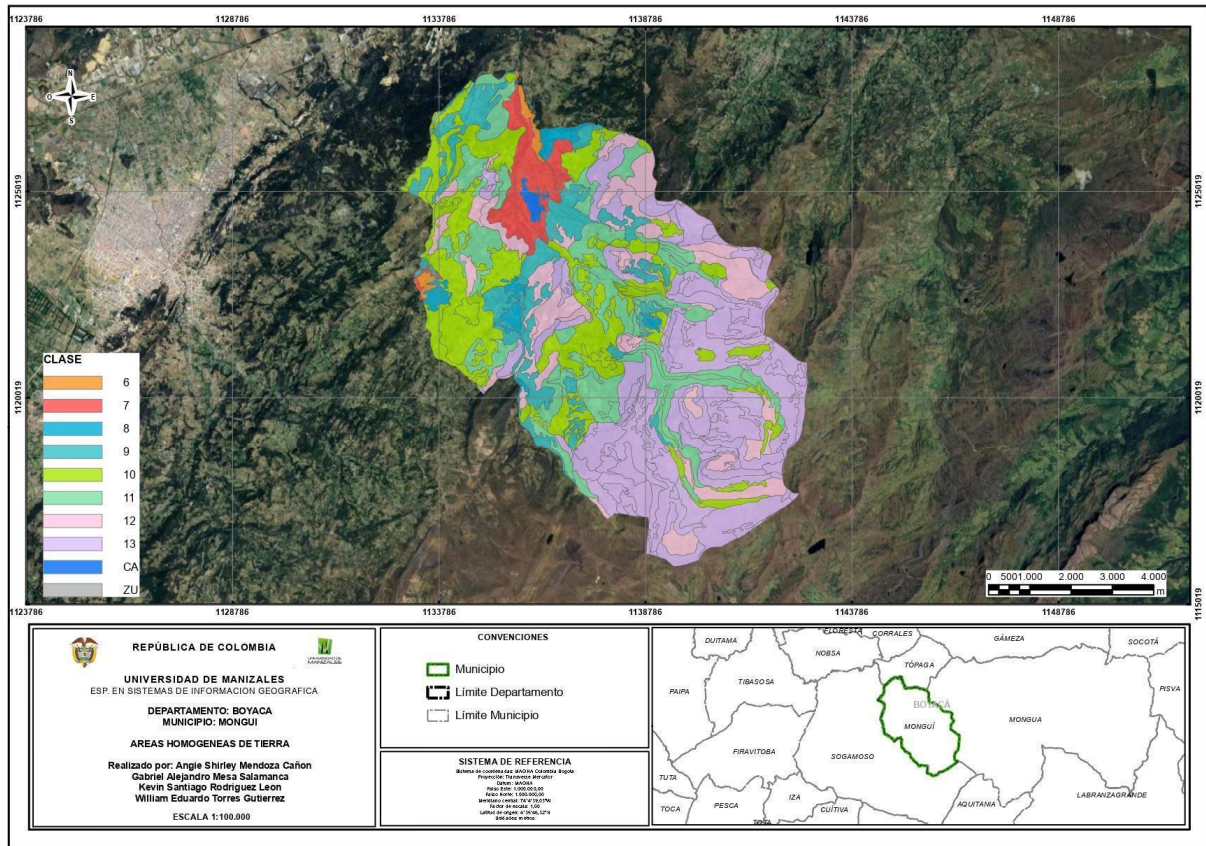


Ilustración 23. Variable final Áreas Homogéneas de Tierra

En cuanto a las pendientes, su análisis se desarrolló como un complemento necesario para enriquecer los resultados obtenidos de las AHT. A través del procesamiento de datos topográficos derivados de un DEM, se logró clasificar el terreno del municipio en diferentes categorías de inclinación. Este análisis permitió observar la variabilidad del relieve en el área de estudio y generar una representación vectorial simplificada mediante herramientas de generalización espacial, asegurando una integración efectiva al análisis general del territorio.

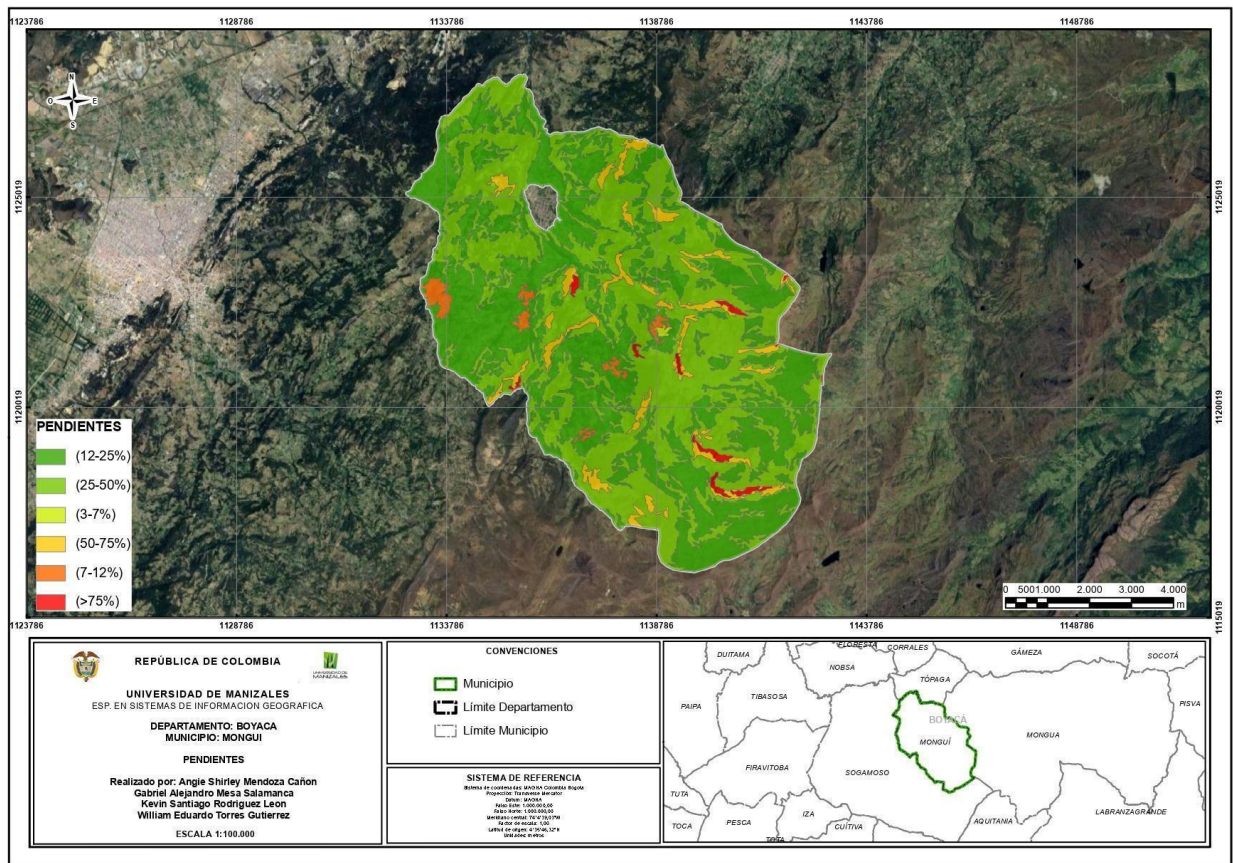


Ilustración 24. Variable final Pendientes

Estos resultados, al combinar las AHT y la variable de pendientes, ofrecen una visión más completa de las condiciones del terreno, permitiendo identificar zonas clave para distintos usos, como conservación, producción y desarrollo sostenible en Monguí.

7.5 Disponibilidad De Aguas Superficiales Permanentes

Con la información consolidada, se procedió a definir la variable de disponibilidad de aguas, considerando la capa predial del municipio. Se clasificaron los predios en cuatro categorías según la disponibilidad de agua:

- Aguas abundantes
- Aguas suficientes
- Aguas escasas

- Zonas sin agua

La categoría de zonas sin agua se definió basándose en el Manual de Zonas Homogéneas Físicas del IGAC, que asocia estas áreas con pendientes superiores al 50%. Para identificarlas, se fusionaron las capas de Áreas Homogéneas de Tierra y de Pendientes, generando una clasificación final que permitió delimitar las zonas sin acceso a fuentes hídricas.

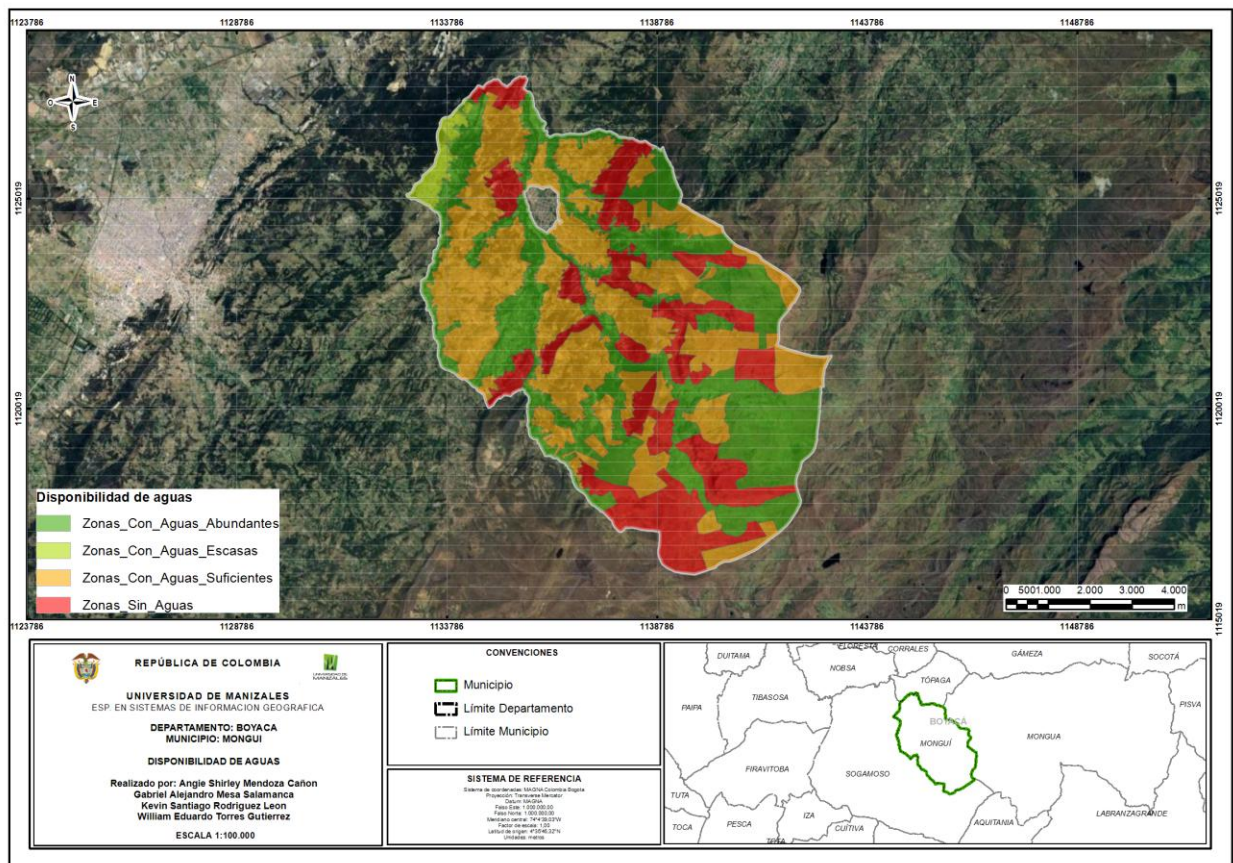


Ilustración 25. Variable final Disponibilidad de Aguas Superficiales Permanentes

7.6 Zonas Homogéneas Físicas Rurales

Finalmente, habiendo obtenido las variables requeridas para el desarrollo de la metodología (áreas homogéneas de tierra, norma de uso del suelo, uso actual del suelo, influencia de las vías, disponibilidad de aguas superficiales permanentes y pendiente), se realizó el cruce o intersección entre estas y una depuración de los polígonos resultantes, los cuales corresponden finalmente a las ZHF Rurales actualizadas del municipio de Monguí, representadas en el siguiente plano:

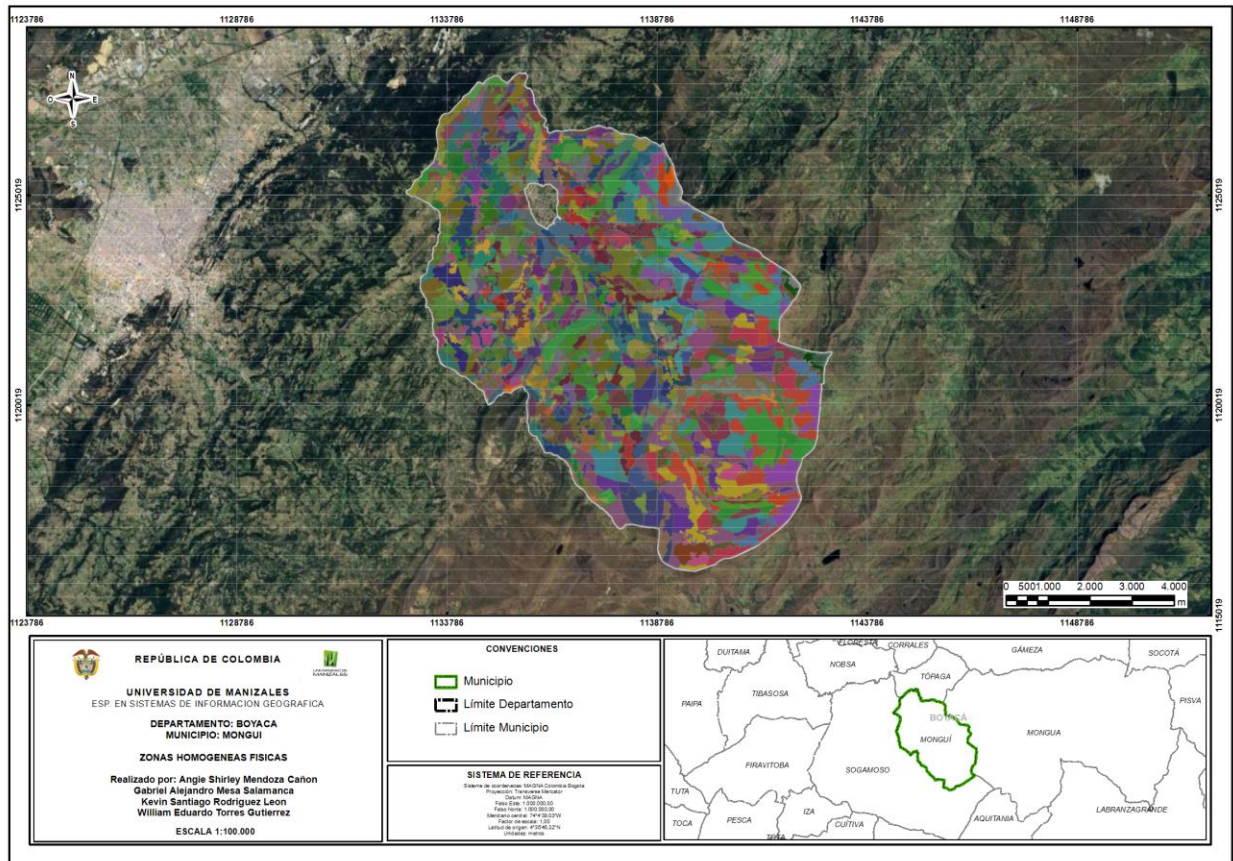


Ilustración 26. Zonas Homogéneas Físicas Rurales finales obtenidas para el municipio de Monguí

Al realizar un análisis de las ZHF vigentes en el municipio de Monguí, elaboradas en 1993, se evidencia un incremento de 238 zonas en la propuesta actual. Esta variación puede atribuirse a varios factores, entre ellos la vigencia de la información, considerando que existe una desactualización de más de 30 años. Adicionalmente, los insumos utilizados en ese entonces reflejan limitaciones propias de la época y de la tecnología disponible al momento de su elaboración.

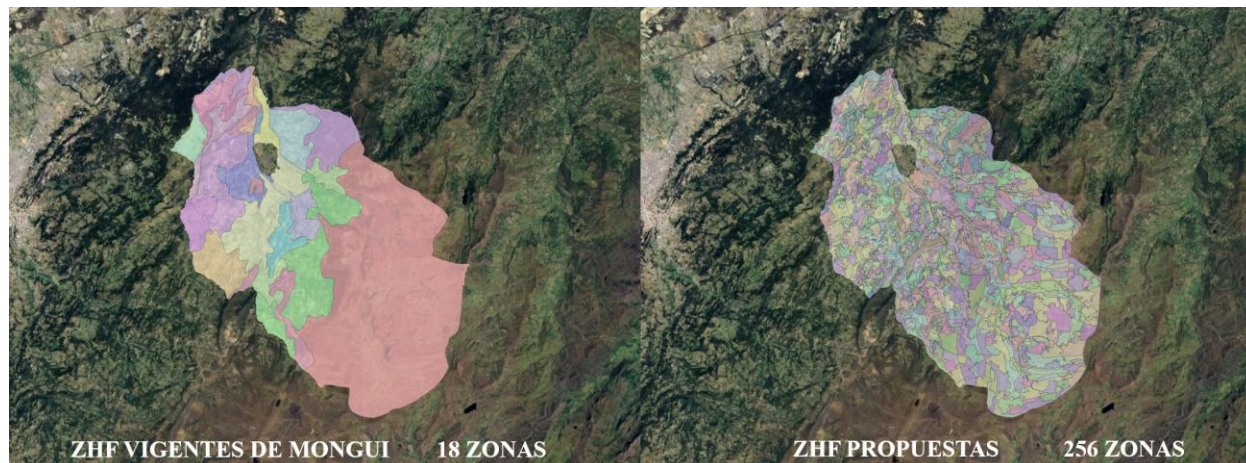


Ilustración 27. Comparación Zonas Homogéneas Físicas Rurales 1993 - Propuestas

También es importante resaltar que, al analizar la información disponible de las zonas homogéneas físicas vigentes de Monguí, se evidencian varias particularidades. Entre ellas, destaca que el atributo relacionado con el uso normativo del suelo no fue tenido en cuenta en dichas zonas, probablemente porque para ese momento no se contaba con una reglamentación específica, dado que el instrumento de ordenamiento territorial del municipio fue adoptado posteriormente, mediante el Acuerdo 007 del año 2004. Otra razón que justifica el aumento en la cantidad de zonas es la fuente de insumo utilizada para las Áreas Homogéneas de Tierra (AHT), ya que el Instituto Geográfico Agustín Codazzi actualiza constantemente esta información a una escala de buen detalle, como es la 1:25.000. En el presente análisis se emplearon AHT relativamente recientes, correspondientes al año 2019.

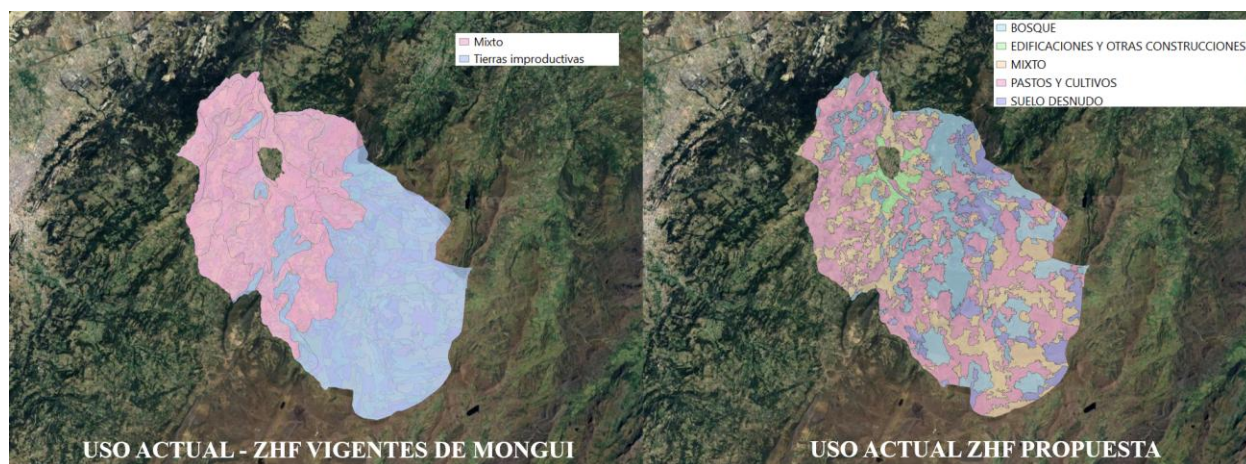


Ilustración 28. Comparación Variable Uso Actual del Suelo 1993 - Propuesto

Se resalta nuevamente el uso de métodos de inteligencia artificial mediante los algoritmos implementados. Como se evidencia en los planos anteriores, en las ZHF vigentes solo se consideraron dos categorías para el uso actual del suelo, mientras que en la propuesta desarrollada en el presente estudio se definieron cinco categorías: Bosque, Edificaciones y otras construcciones, Mixto, Pastos y cultivos, y Suelo desnudo. En los diagramas a continuación se presenta la distribución de los usos actuales del suelo en ambas temporalidades: las determinadas en las zonas vigentes y las propuestas con base en la metodología actual.



Ilustración 29. Diagramas Variable Uso Actual del Suelo 1993 - Propuesto

Como se observa en los gráficos, las ZHF vigentes presentan una clasificación simplificada del uso actual del suelo, limitada únicamente a dos categorías: tierra improductiva y uso mixto, con una distribución casi equitativa. En contraste, la propuesta generada mediante inteligencia artificial permite una diferenciación más precisa, incorporando cinco categorías que reflejan de manera más fiel la realidad del territorio. Se destaca que los usos predominantes en la nueva clasificación son: Pastos y cultivos (43%), Suelo desnudo (24%), Bosque (22%), Mixto (9%) y Edificaciones y otras construcciones (2%). Esta clasificación, más específica, contribuye de forma significativa a una caracterización más detallada del suelo, aspecto esencial para los procesos de actualización catastral y la planificación territorial.

6. Conclusiones

La implementación de tecnologías de inteligencia artificial y herramientas geoespaciales permite actualizar las ZHF Rurales del municipio de Monguí, Boyacá, de manera eficiente y precisa. Este proceso no solo cumplió con los estándares técnicos establecidos, sino que también optimizó el tiempo y los recursos necesarios en comparación con los métodos tradicionales, consolidándose como una solución viable para abordar la desactualización catastral en áreas rurales.

El uso de imágenes satelitales de alta resolución y DEM resultó fundamental para generar un análisis detallado del territorio, facilitando la delimitación precisa de las ZHF Rurales mediante la integración de variables clave como el uso del suelo, la influencia vial y la disponibilidad de aguas. Este enfoque no solo moderniza los procesos de gestión territorial, sino que también mejora significativamente la precisión y representatividad de los datos catastrales.

La implementación del algoritmo de SVM, en combinación con técnicas avanzadas de segmentación orientada a objetos, fue clave para lograr una representación precisa y coherente del uso del suelo. Este enfoque permitió superar las limitaciones de las clasificaciones pixel a pixel, que tienden a generar fragmentaciones innecesarias o efectos de “sal y pimienta” debido al ruido en áreas con alta variabilidad espacial. La segmentación orientada a objetos agrupó píxeles en segmentos más grandes basándose en características como textura y forma, mejorando así la representación espacial de las entidades del paisaje. Sin embargo, este método requirió un mayor esfuerzo y depuración al momento de generar los polígonos utilizados para el entrenamiento de la clasificación, asegurando la calidad y coherencia de los resultados.

A pesar de los avances logrados con la segmentación y clasificación orientada a objetos con el algoritmo SVM, los resultados requirieron ajustes adicionales. La suavización de niveles digitales y la simplificación de polígonos generados resultaron imprescindibles para garantizar la calidad y usabilidad de los datos, especialmente en áreas con firmas espectrales diversas, como construcciones y zonas urbanas. Este proceso no solo mejoró la precisión de los resultados geoespaciales, sino que también facilitó su interpretación y su integración en sistemas de información geográfica (SIG). Las SVM demostraron ser especialmente efectivas al manejar grandes volúmenes de datos espectrales, logrando clasificaciones robustas y fiables con métricas

destacadas: un coeficiente Kappa de 0.76 y un P_Accuracy total de 0.82, con clases como bosque y construcciones alcanzando precisiones superiores al 80%.

Por otra parte, las CNN demostraron su capacidad para identificar elementos lineales como vías rurales, incluso en áreas con condiciones complejas como nubosidad o vegetación densa. El algoritmo logró un MIOU de 0.62 y un puntaje F1 de 0.76, lo que evidencia un equilibrio adecuado entre precisión y recuperación de información. En algunos casos, las vías identificadas fueron incluso más detalladas que lo que podía observarse a simple vista, representando un insumo valioso para la construcción de cartografía base en áreas rurales. No obstante, el método requiere altos niveles de validación y ajuste manual para asegurar la calidad final de los resultados.

El uso combinado de SVM y CNN no solo permitió superar desafíos asociados a la clasificación y segmentación de áreas con alta variabilidad espacial, sino que también destacó el potencial transformador de la inteligencia artificial en los procesos de análisis territorial. Estos enfoques avanzados optimizan recursos, reducen costos y facilitan la generación de información clave para la gestión catastral y la implementación del catastro multipropósito y los procesos de actualización catastral con enfoque multipropósito. De cara al futuro, se recomienda integrar variables adicionales, como datos socioeconómicos y ambientales, así como explorar modelos híbridos que combinen técnicas supervisadas y no supervisadas para abordar desafíos más complejos.

Respecto a la variable de disponibilidad de aguas superficiales permanentes, se utilizó un DEM de ALOS PALSAR en conjunto con otro generado a partir de curvas de nivel para identificar redes de drenaje y cuerpos de agua, garantizando la consistencia del modelo al corregir depresiones y generar flujos continuos. A partir del DEM, se analizaron direcciones y acumulaciones de flujo, permitiendo delimitar tanto drenajes principales como secundarios. Este proceso incluyó ajustes para mejorar la densidad de la red hídrica según las necesidades del análisis, logrando una representación precisa de las áreas con disponibilidad de agua superficial. Por su parte, la pendiente, aunque implícita en otras variables como las AHT, demostró ser un insumo valioso como variable independiente, enriqueciendo los análisis y permitiendo una interpretación más detallada del terreno. Las variables de norma de uso del suelo y AHT, aunque basadas en datos históricos, mantienen su relevancia para la toma de decisiones por parte de propietarios, el estado y entidades territoriales. El uso de geoprocesamientos basados en DEM destaca como una herramienta esencial para identificar pendientes y cuerpos de agua, convirtiéndose en un insumo

clave para el análisis de esta variable. Además, estos resultados fueron integrados directamente en la clasificación final conforme a la metodología IGAC, cruzándose con la malla predial para garantizar una evaluación completa y detallada.

El resultado final mostró un número elevado de ZHF Rurales (256), lo cual puede atribuirse a la alta precisión en las variables utilizadas, la incorporación de imágenes satelitales de alta resolución y el nivel de detalle aplicado en variables como la norma de uso del suelo, el uso actual del suelo y las zonas homogéneas de tierra. Este número elevado no representa un resultado negativo, sino que refleja una diferenciación más clara y precisa de las características territoriales, lo que tiene implicaciones positivas en procesos de ordenamiento territorial y gestión del suelo. Además, esta segmentación detallada permitirá identificar de manera más específica las variaciones dentro del territorio, fortaleciendo la planificación territorial. En general, los resultados obtenidos reflejan una importante diferencia con las ZHF Rurales vigentes, evidenciando la necesidad de actualizar la información catastral en el municipio de Monguí.

Es importante destacar que, al pasar a estudios de valor para las Zonas Homogéneas Geoeconómicas, se espera que estas zonas físicas se agrupen, resultando en coberturas más amplias y homogéneas, con un número menor de zonas geoeconómicas en comparación con las físicas. Este proceso es natural y demuestra que la metodología aplicada no solo fue precisa, sino que está alineada con los objetivos de proporcionar información útil y diferenciada para la actualización catastral y el desarrollo territorial.

Este trabajo no solo genera un insumo clave para los procesos de actualización catastral actualmente en curso, sino que también establece un precedente metodológico replicable en otros municipios. La inteligencia artificial, junto con imágenes multiespectrales y herramientas SIG, tiene el potencial de jugar un papel protagónico en la modernización de los estudios territoriales en Colombia y la implementación del catastro multipropósito, marcando un camino hacia una planificación territorial más eficiente y sostenible.

7. Recomendaciones

Es fundamental que se priorice la implementación de tecnologías de inteligencia artificial y herramientas geoespaciales en los procesos de actualización catastral, ya que estas metodologías han demostrado gran potencial para la optimización de recursos tanto económicos como de capital humano y temporal. En particular, la combinación de algoritmos como el SVM y las CNN con imágenes satelitales de alta resolución y DEM ha permitido obtener resultados altamente diferenciados y detallados del territorio. Sin embargo, es necesario que, a medida que se adopten estas tecnologías, se desarrollen metodologías que simplifiquen la transición de ráster a polígonos, la consolidación de clases y la identificación de cuerpos de agua. Esto contribuiría a la automatización de procesos clave, optimizando aún más los resultados obtenidos.

Además, dado el éxito de esta metodología en el municipio de Monguí, es recomendable explorar su replicabilidad en otras regiones con características similares. Este enfoque escalable no solo contribuiría a la modernización catastral a nivel nacional, sino que también permitiría adaptar las metodologías a distintos contextos locales, asegurando que las soluciones sean flexibles y pertinentes. Junto con esto, la incorporación de tecnologías emergentes como drones, sensores LIDAR y datos multiespectrales puede complementar los análisis y enriquecer la información, proporcionando mayor precisión y cobertura, especialmente en áreas de difícil acceso.

La capacitación y sensibilización de los funcionarios locales es otro aspecto crucial para garantizar que las tecnologías y los resultados sean utilizados correctamente. Es esencial establecer programas de formación continua que aseguren la interpretación adecuada de los datos obtenidos, favoreciendo la sostenibilidad de estos procesos en el largo plazo. Paralelamente, la participación activa de la comunidad en los procesos de actualización catastral también es clave. Involucrar a los habitantes del municipio, mediante talleres y actividades participativas, no solo enriquece los datos recolectados, sino que también asegura que las decisiones tomadas reflejen las verdaderas necesidades y características del territorio.

A lo largo del proyecto, se ha demostrado que los algoritmos de inteligencia artificial aplicados a la gestión territorial son efectivos y ofrecen un gran potencial para perfeccionarse. Es recomendable continuar investigando y desarrollando modelos híbridos que combinen técnicas supervisadas y no supervisadas, de manera que se puedan abordar desafíos específicos como la identificación de elementos complejos o parcialmente visibles en imágenes satelitales, o la clasificación en áreas de baja resolución.

Finalmente, para garantizar que la información catastral se mantenga precisa y relevante, se sugiere establecer mecanismos de actualización periódica. Esto permitiría incorporar cambios en el uso del suelo, infraestructura y recursos naturales en tiempo real, asegurando que la información siga siendo útil y adaptada a las dinámicas del territorio. En este sentido, aunque el número elevado de ZHF pueda parecer un desafío, esta diferenciación detallada del territorio representa una ventaja significativa. A medida que se realicen estudios de valor para las Zonas Homogéneas Geoeconómicas, se espera que estas se agrupen, resultando en una representación más simplificada y homogénea del territorio, lo que será de gran utilidad para los procesos de planificación y ordenamiento territorial.

8. Referencias

- Abdollahi, A., Pradhan, B., Shukla, N., Chakraborty, S., & Alamri, A. (2020). Deep Learning Approaches Applied to Remote Sensing Datasets for Road Extraction: A State-Of-The-Art Review. *Remote Sensing*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/rs12091444>
- ASF, engineering. (2015). *ASF Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products*. Product guide.
- Ayala, C., Sesma, R., Aranda, C., & Galar, M. (2021). A Deep Learning Approach to an Enhanced Building Footprint and Road Detection in High-Resolution Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 13(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/rs13163135>
- Bangira, T., Alfieri, S. M., Menenti, M., & van Niekerk, A. (2019). Comparing Thresholding with Machine Learning Classifiers for Mapping Complex Water. *Remote Sensing*, 11(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/rs11111351>
- Bennett, R. M., Koeva, M., & Asiama, K. (2021). Review of Remote Sensing for Land Administration: Origins, Debates, and Selected Cases. *Remote Sensing*, 13(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/rs13214198>
- Bennett, R., Oosterom, P. van, Lemmen, C., & Koeva, M. (2020). Remote Sensing for Land Administration. *Remote Sensing*, 12(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/rs12152497>
- Boser, B. E., Guyon, I. M., & Vapnik, V. N. (1992). A training algorithm for optimal margin classifiers. *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory*, 144-152. <https://doi.org/10.1145/130385.130401>
- Cadastrre 2034 | Toitū Te Whenua—Land Information New Zealand*. (2014, febrero 3). <https://www.linz.govt.nz/resources/strategy/cadastrre-2034>
- Cali, P. A. de S. de. (2015, noviembre 6). *Catastro Municipal aclara qué son zonas homogéneas*. Portal Alcaldía de Santiago de Cali. <https://www.cali.gov.co/hacienda/publicaciones/111787/catastro-municipal-aclara-que-son-zonas-homogeneas/>
- Categorización de Departamentos, distritos y municipios*. (s. f.). Contaduría General de la Nación. Recuperado 26 de mayo de 2025, de <https://www.contaduria.gov.co/categorizacion-de-departamentos-distritos-y-municipios>

- Contreras, B. P. U., Pisco, A. R., González, J. O. E., & Santacruz, J. S. R. (2023). *DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE)*.
- Crommelinck, S., Koeva, M., Yang, M. Y., & Vosselman, G. (2019). Application of Deep Learning for Delineation of Visible Cadastral Boundaries from Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*, 11(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/rs11212505>
- Cundinamarca, G. de. (2019). *Análisis de Situación de Salud - ASIS con el modelo de los determinantes sociales en salud: Actualización año 2019* [Working Paper]. Escuela Superior de Administración Pública ESAP. <https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/20.500.14471/25497>
- Dale, P., & McLaughlin, J. (2000). *Land Administration*. Oxford University Press.
- Deepan, P., Abinaya, S., Haritha, G., & Iswarya, V. (s. f.). *ROAD RECOGNITION FROM REMOTE SENSING IMAGERY USING MACHINE LEARNING*. 05(03).
- Departamento Nacional de Planeación. (2024). *Diagnóstico municipal—Catastro Multipropósito*. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaZjNjYmI1NWEtMWNiZi00ZGEzLWFjMzAtNWY2YzBkMjdmN2M1IiwidCI6IjA0MjYwZTIwLTIzNGMtNGM5Zi1hOWRkLTc5Mjg2YjFiNzBhYyIsImMiOjR9>
- Estrategia para la implementación de la política pública de catastro multipropósito. Departamento Nacional de Planeación., No. CONPES 3958 (2019).
- FIG. (2020). *International Institution for the History of Surveying and Measurement—History of Cadastral Systems*. https://www.fig.net/organisation/perm/hsm/history_of/cadastre.asp
- Gang, H., Chen, J., Li, Z., Lin, Zhao, R., & Liang. (2008). *ROAD DATA UPDATING USING TOOLS OF MATCHING AND MAP GENERALIZATION*.
- Hamad, R. (2020). An Assessment of Artificial Neural Networks, Support Vector Machines and Decision Trees for Land Cover Classification Using Sentinel-2A Data. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 8(6), Article 6. <https://doi.org/10.12691/aees-8-6-18>
- Helber, P., Bischke, B., Dengel, A., & Borth, D. (2019). *EuroSAT: A Novel Dataset and Deep Learning Benchmark for Land Use and Land Cover Classification* (No. arXiv:1709.00029). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.00029>
- Henry, C., Azimi, S. M., & Merkle, N. (2018). Road Segmentation in SAR Satellite Images With Deep Fully Convolutional Neural Networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(12), 1867-1871. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2864342>

- Hocking, R. R. (1976). A Biometrics Invited Paper. The Analysis and Selection of Variables in Linear Regression. *Biometrics*, 32(1), 1-49. <https://doi.org/10.2307/2529336>
- ICDE. (2022). *Catastro Multipropósito y la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales, cómo entender la relación y el beneficio | Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales*. <https://www.icde.gov.co/comunicaciones/noticias/catastro-multiproposito-y-la-infraestructura-colombiana-de-datos-espaciales>
- IGAC. (2020). *Plan estratégico institucional 2020–2023*. IGAC. «Geografía para la vida».
- IGAC. (2021). *Instructivo IN-FAC-PC03-01: Elaboración del estudio de zonas homogéneas físicas y geoeconómicas y determinación del valor unitario e integral (PH) por tipo de construcción (Versión 1)*.
- IGAC. (2023). *Resolución 1040 de 2023 | Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. <https://www.igac.gov.co/transparencia-y-acceso-a-la-informacion-publica/normograma/resolucion-1040-de-2023>
- IGAC. (2024a). *10 municipios de Boyacá inician los procesos de actualización catastral con enfoque multipropósito*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- IGAC. (2024b). *Plan Operativo de Formación y/o Actualización Catastral 2023–2024*.
- IGAC. (2024c). *Procedimiento PC-GCT-03: Elaboración, revisión, modificación y ajustes de los estudios de Zonas Homogéneas Físicas y Geoeconómicas (Versión 2)*.
- IGAC. (2024d). *Resolución 746 de 2024: Por medio de la cual se modifica parcialmente la Resolución N°. 1040 del 08 de agosto de 2023, única de la gestión catastral multipropósito*.
- IGAC. (2024e). *Resolución 1912 de 2024: Por medio de la cual se adopta la metodología para la actualización masiva de valores catastrales rezagados en las zonas rurales, que permita realizar el ajuste automático al que se refiere el artículo 49 de la Ley 2294 de 2023*.
- IGAC & SNR. (2024). *Resolución Conjunta 662 de 2024: Por la cual se adopta el Modelo Extendido Catastro—Registro a partir del Modelo Núcleo LADM_COL para el desarrollo de la gestión catastral con enfoque multipropósito en el marco del Sistema de Administración del Territorio – SAT y se modifica la Instancia de Coordinación para la gobernanza y la aprobación de nuevas versiones de este Modelo*.
- INDEPAZ. (2022). *Catastro multipropósito en el acuerdo de paz – Indepaz*. <https://indepaz.org.co/catastro-multiproposito-en-el-acuerdo-de-paz-por-gloria-c-barney/>

- International Association of Assessing Officers., I. (2017). *Standard on mass appraisal of real property: A criterion for measuring fairness, quality, equity, and accuracy*. International Association of Assessing Officers.
- Kelly, M., Blanchard, S. D., Kersten, E., & Koy, K. (2011). Terrestrial Remotely Sensed Imagery in Support of Public Health: New Avenues of Research Using Object-Based Image Analysis. *Remote Sensing*, 3(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/rs3112321>
- Kocur-Bera, K., & Grzelka, I. (2022). Impact of Modern Technologies on the Organization of the Cadastral Data Modernization Process. *Sustainability*, 14(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/su142416649>
- Koeva, M., Bennett, R., & Persello, C. (2022). Remote Sensing for Land Administration 2.0. *Remote Sensing*, 14(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/rs14174359>
- Krelle, A., & Rajabifard, abbas. (2014). *CADASTRE 2014: NEW CHALLENGES AND DIRECTION*.
- Leroueil, S., & Picarelli, L. (2012). *Assessment of Slope Stability*. 122-156. <https://doi.org/10.1061/9780784412138.0006>
- Liu, S., DU, K., Zheng, Y., CHEN, J., DU, P., & TONG, X. (2023). Remote sensing change detection technology in the Era of artificial intelligence : Inheritance, development and challenges. *National Remote Sensing Bulletin*, 27, 1975-1987. <https://doi.org/10.11834/jrs.20222199>
- Mika, M. (2019). Modernisation of the Cadastre in Poland as a tool to improve the land management and administration process. *Survey Review*, 52(372), 224-234. <https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1610211>
- Misra, A., Vojinovic, Z., Ramakrishnan, B., Luijendijk, A., & Ranasinghe, R. (2018). Shallow water bathymetry mapping using Support Vector Machine (SVM) technique and multispectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 39, 1-20. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1421796>
- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>
- Paladi, A. (2024). WAYS OF IMPROVING THE METHODOLOGICAL FRAMEWORK OF MASSIVE EVALUATION OF REAL ESTATE IN THE REPUBLIC OF MOLDOVA.

JOURNAL OF SOCIAL SCIENCES, 7(2), Article 2.
[https://doi.org/10.52326/jss.utm.2024.7\(2\).03](https://doi.org/10.52326/jss.utm.2024.7(2).03)

Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026. (s. f.). Recuperado 26 de mayo de 2025, de <https://www.dnp.gov.co:443/plan-nacional-desarrollo/pnd-2022-2026>

Política para la adopción e implementación de un catastro multipropósito Rural-Urbano. Departamento Nacional de Planeación., No. CONPES 3859 (2016).

Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 “Colombia Potencia Mundial de la Vida”., No. Ley 2294 de 2023 (2023).

Por el cual se reglamentan parcialmente el artículo 37 de la Ley 9 de 1989, el artículo 27 del Decreto-ley 2150 de 1995, los artículos 56, 61, 62, 67, 75, 76, 77, 80, 82, 84 y 87 de la Ley 388 de 1997 y el artículo 11 del Decreto-ley 151 de 1998, que hacen referencia al tema de avalúos. Diario Oficial No. 43.349 de 29 de julio de 1998., No. Decreto 1420 de 1998 (1998).

Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018–2022 “Pacto por Colombia, pacto por la equidad”., No. Ley 955 del 2019 (2019).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=93970>

Por medio del cual se expide el decreto reglamentario único del sector administrativo de información estadística. Colombia., No. Decreto 148 (2020).

Postill, H., Helm, P. R., Dixon, N., Glendinning, S., Smethurst, J. A., Rouainia, M., Briggs, K. M., El-Hamalawi, A., & Blake, A. P. (2021). Forecasting the long-term deterioration of a cut slope in high-plasticity clay using a numerical model. *Engineering Geology*, 280, 105912.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105912>

PREGUNTAS FRECUENTES. (s. f.). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Recuperado 26 de mayo de 2025, de <https://antiguo.igac.gov.co/es/catastro-multiproposito/preguntas-frecuentes>

Reajuste de avalúos catastrales para la vigencia 2024. Departamento Nacional de Planeación., No. CONPES 4128 (2023).

Richards, J. (2005). *Remote sensing digital image analysis: An introduction*. Springer.
https://www.researchgate.net/publication/200004874_Remote_Sensing_Digital_Image_Analysis_An_Introduction


- S Enemark., McLaren, R., & Lemmen, C. (2016). *Fit-For-Purpose Land Administration: Guiding Principles for Country Implementation (English and French) – Global Land Tool Network*. <https://gltln.net/2016/11/01/fit-for-purpose-land-administration-guiding-principles-for-country-implementation/>
- Sertel, E., Hucko, C. M., & Kabadayı, M. E. (2024). Automatic Road Extraction from Historical Maps Using Transformer-Based SegFormers. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/ijgi13120464>
- Talukdar, S., Singha, P., Mahato, S., Shahfahad, Pal, S., Liou, Y.-A., & Rahman, A. (2020). Land-Use Land-Cover Classification by Machine Learning Classifiers for Satellite Observations—A Review. *Remote Sensing*, 12(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/rs12071135>
- Valencia, B. 1, & Upegui, E. 2 1 I. C. y G. (2020). *Propuesta metodológica para generar mapas de cobertura de la tierra a partir de imágenes de radar ALOS/PALSAR: Estudio de caso Mompós, Colombia*. 56-68.
- Vogiatzis, M. (2006). *Cadastral Mapping of Forestlands in Greece: Current and Future Challenges*.
- Wei, C., Fu, M., Wang, L., Yang, H., Tang, F., & Xiong, Y. (2022). The Research Development of Hedonic Price Model-Based Real Estate Appraisal in the Era of Big Data. *Land*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/land11030334>
- Whiteside, T. G., Boggs, G. S., & Maier, S. W. (2011). Comparing object-based and pixel-based classifications for mapping savannas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(6), 884-893. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.06.008>
- Williamson, P. I. P. (2011). *THE EVOLUTION OF MODERN CADASTRES*.
- Xia, X., Persello, C., & Koeva, M. (2019). Deep Fully Convolutional Networks for Cadastral Boundary Detection from UAV Images. *Remote Sensing*, 11(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/rs11141725>
- Yagmur, N., Musaoglu, N., & Taskin, G. (2019). DETECTION OF SHALLOW WATER AREA WITH MACHINE LEARNING ALGORITHMS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W13, 1269-1273. ISPRS Geospatial Week 2019 (Volume XLII-2/W13) - 10–14 June 2019,

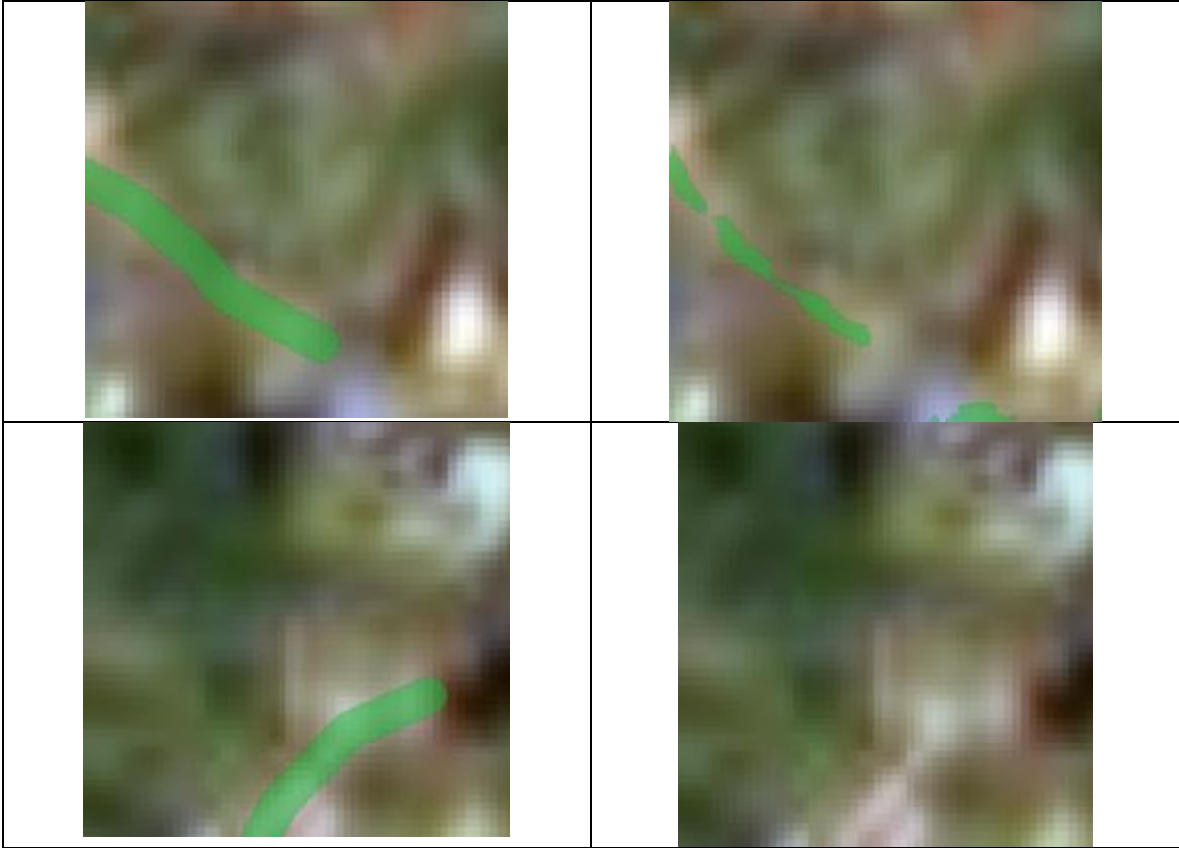
Enschede, The Netherlands. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1269-2019>

Yu, Y., Xia, W., Zhao, Z., & He, B. (2024). A Lightweight and High-Accuracy Model for Pavement Crack Segmentation. *Applied Sciences*, *14*(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/app142411632>

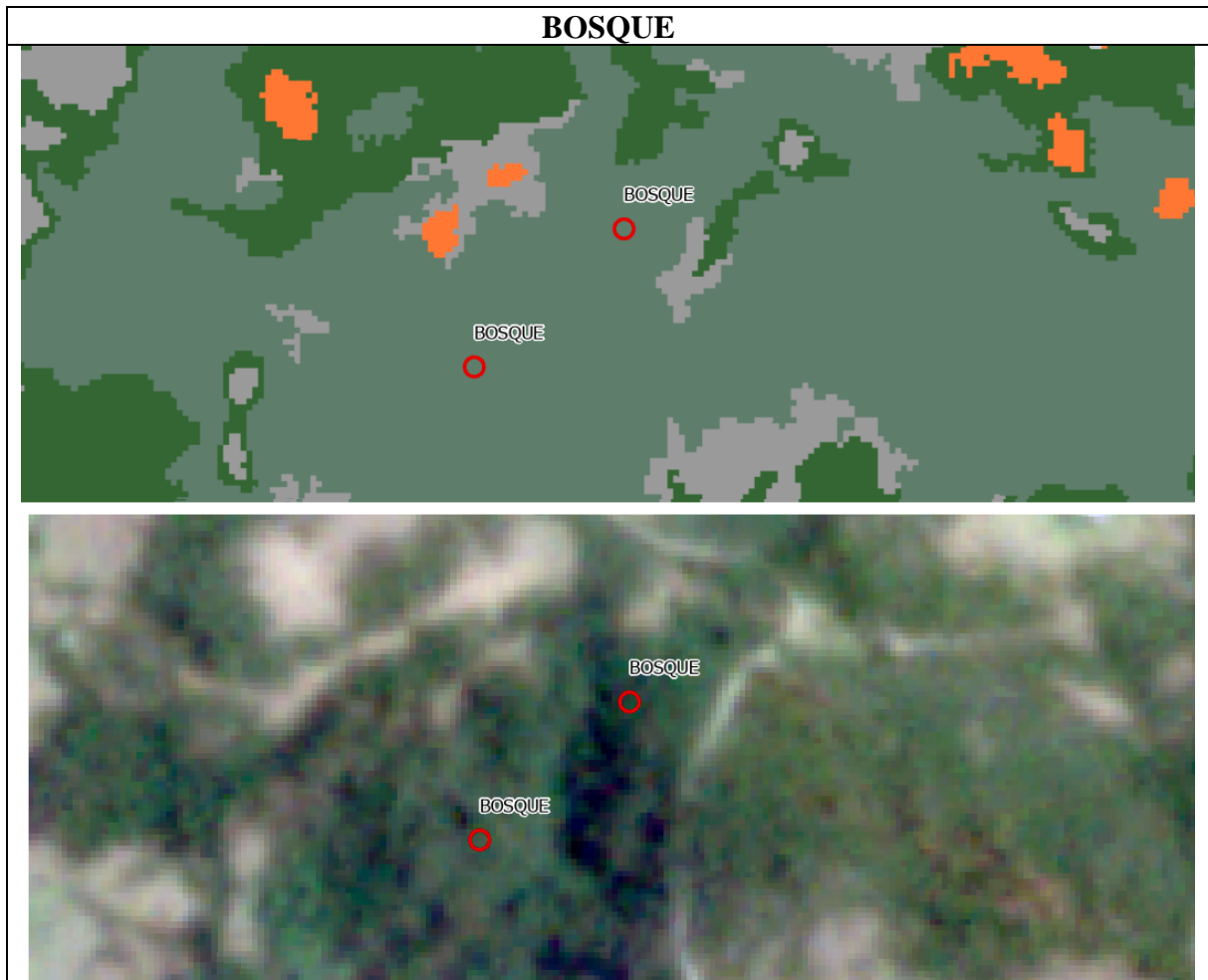
Zhang, W., Tang, P., & Zhao, L. (2019). Remote Sensing Image Scene Classification Using CNN-CapsNet. *Remote Sensing*, *11*(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/rs11050494>

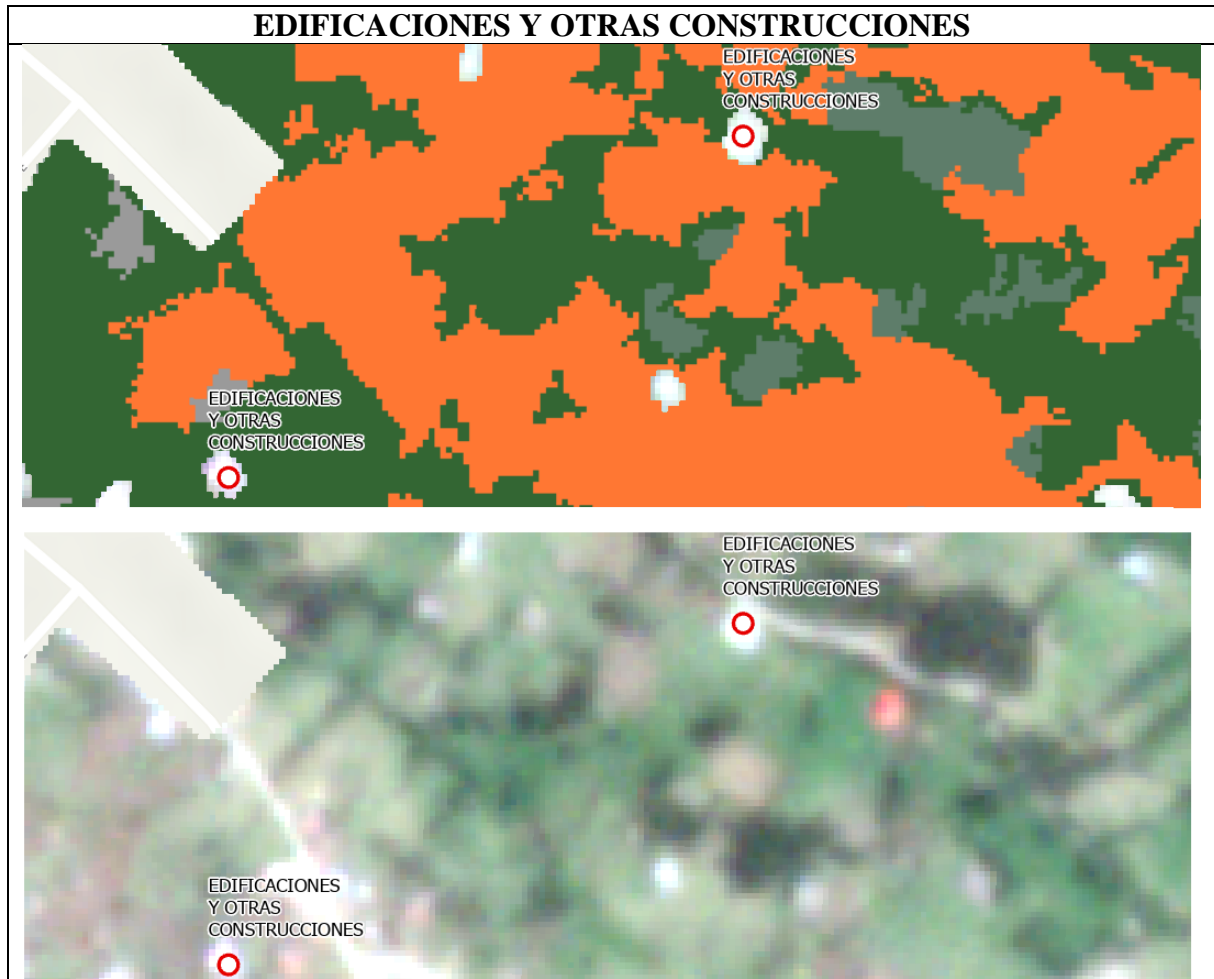
Anexo 1. Datos reales vs predichos, algoritmo CNN para vías

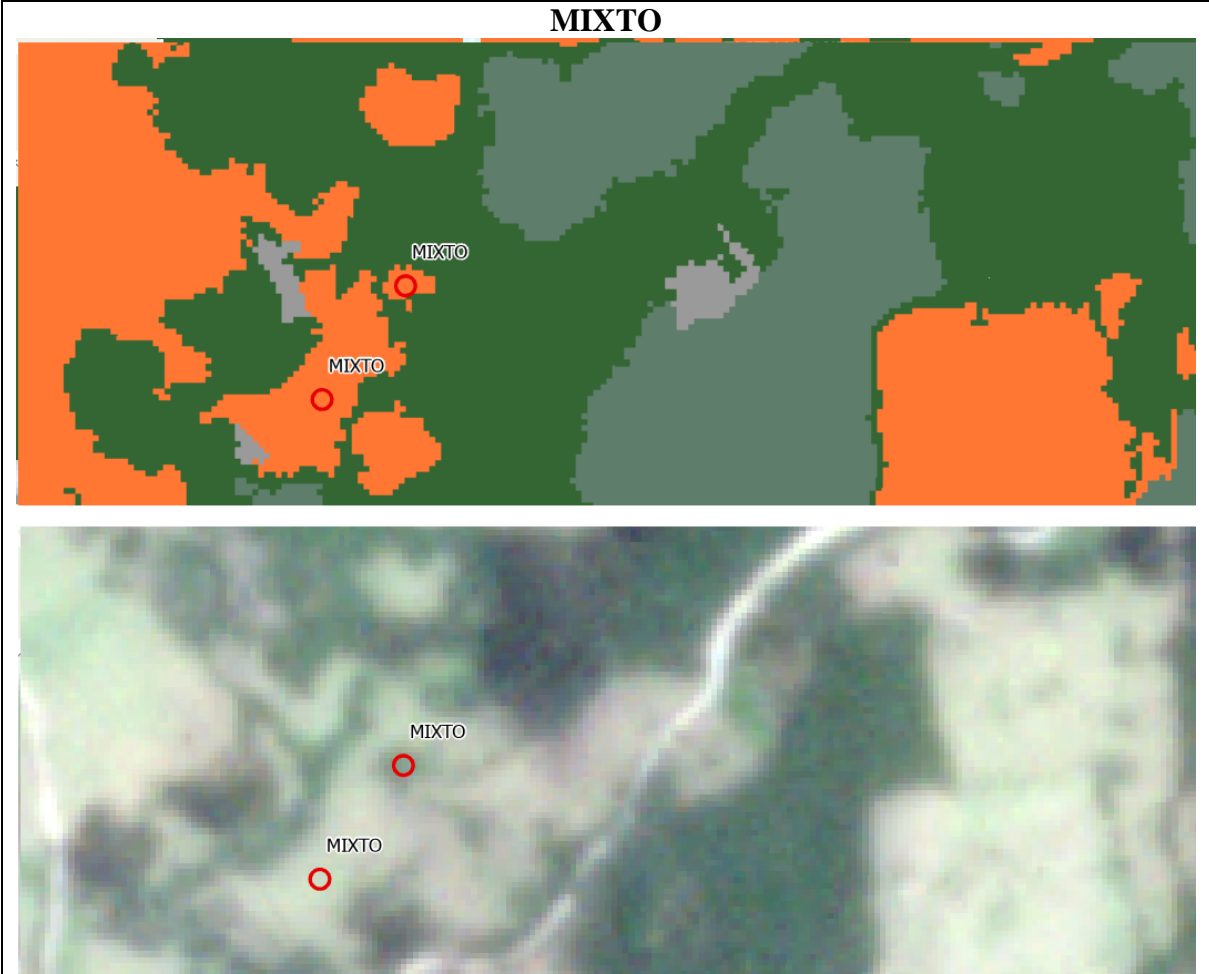
Cobertura real	Cobertura predicha
 A photograph of a road with a green line drawn on the left side, indicating the real road coverage.	 A blurred photograph of the same road scene, representing the predicted road coverage.
 A photograph of a road with a green line on the left and a black rectangular area at the bottom, representing the real road coverage.	 A blurred photograph of the same road scene with a black rectangular area at the bottom, representing the predicted road coverage.
 A photograph of a road with a green line on the left, representing the real road coverage.	 A blurred photograph of the same road scene with a green line on the left, representing the predicted road coverage.

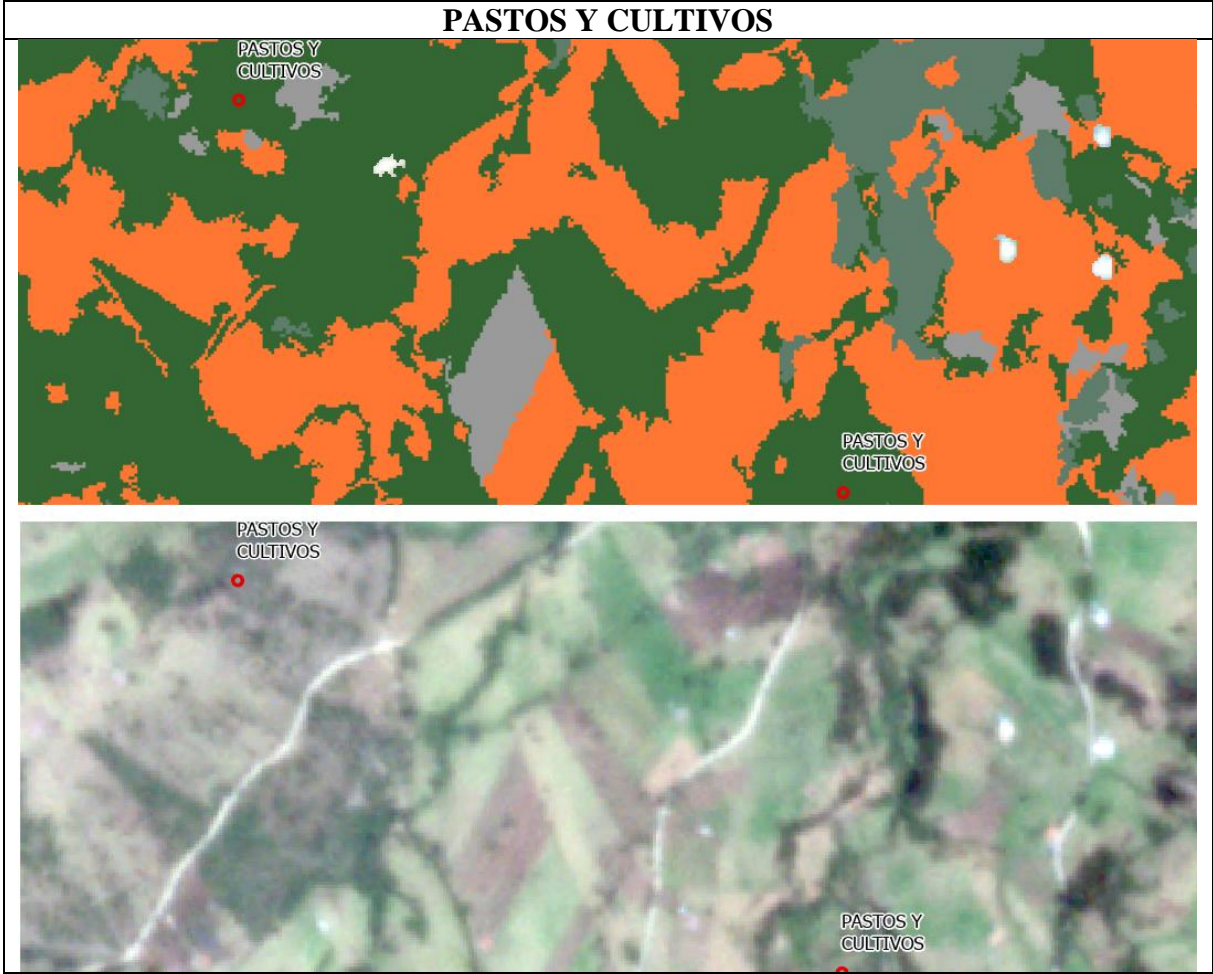


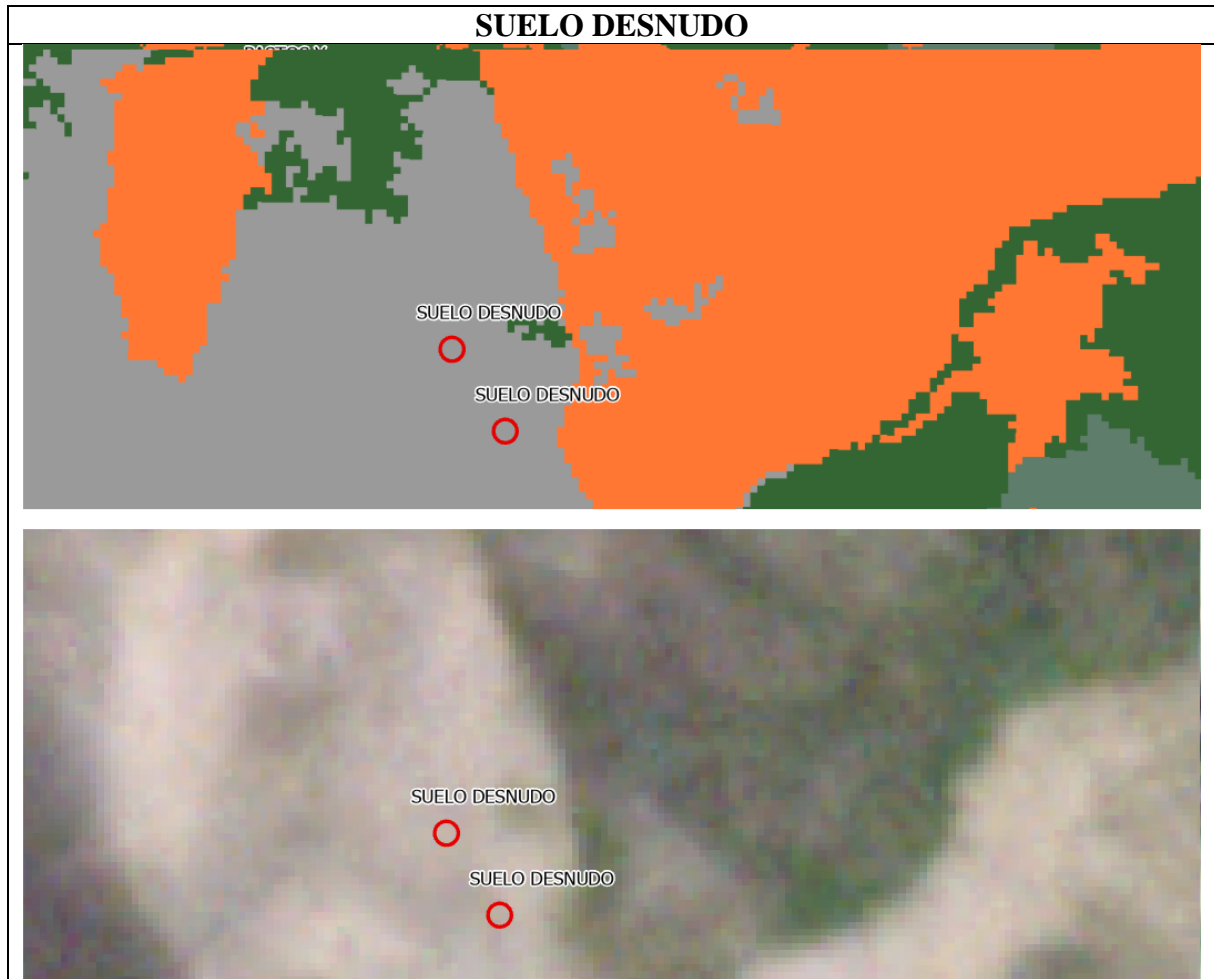
Anexo 2. Comparaciones polígonos de entramiento vs resultado final, clasificación supervisada de uso actual del suelo por algoritmo SVM











Anexo 3. Información alfanumérica Zonas Homogéneas Físicas Rurales finales

Clase AHT	Norma uso del suelo	Uso actual	Influencia vía	Disponibilidad de aguas
6	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
6	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías buenas	Zonas con aguas abundantes
6	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
8	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
8	Zona de paramo	Suelo desnudo	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
8	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
8	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
8	Forestal protectora	Bosque	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
8	Forestal protectora	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
8	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
8	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
8	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
8	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
8	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
10	Zona de paramo	Bosque	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
10	Zona de paramo	Bosque	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
10	Zona de paramo	Bosque	Sin vías	Zonas sin aguas
10	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
10	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
10	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas sin aguas
10	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
10	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

10	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
10	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
10	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas sin aguas
10	Zona de paramo	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
10	Zona de paramo	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
10	Forestal protectora - productora	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas escasas
10	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
10	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
10	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías regulares	Zonas sin aguas
10	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
10	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
10	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
10	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
10	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
10	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
10	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
10	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
10	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
10	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
10	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
10	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas sin aguas
10	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas sin aguas
10	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
10	Forestal protectora	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
10	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
10	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
10	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

10	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
10	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
10	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
10	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
10	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
10	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
10	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
10	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
10	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Bosque	Sin vías	Zonas sin aguas
10	Zona de paramo	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
10	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
10	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
10	Susceptible de actividad minera	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
10	Susceptible de actividad minera	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
10	Susceptible de actividad minera	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
10	Susceptible de actividad minera	Mixto	Vías malas	"Zonas con aguas escasas"
10	Susceptible de actividad minera	Mixto	Vías buenas	"Zonas con aguas escasas"
10	Susceptible de actividad minera	Mixto	Vías buenas	Zonas con aguas abundantes
10	Susceptible de actividad minera	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
10	Susceptible de actividad minera	Pastos y cultivos	Vías malas	"Zonas con aguas escasas"
10	Susceptible de actividad minera	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

10	Susceptible de actividad minera	Pastos y cultivos	Vías buenas	"Zonas con aguas escasas"
10	Susceptible de actividad minera	Pastos y cultivos	Vías regulares	"Zonas con aguas escasas"
11	Zona de paramo	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Zona de paramo	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
11	Zona de paramo	Bosque	Vías malas	Zonas sin aguas
11	Zona de paramo	Bosque	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
11	Zona de paramo	Bosque	Sin vías	Zonas sin aguas
11	Zona de paramo	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
11	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
11	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas sin aguas
11	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
11	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
11	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
11	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas sin aguas
11	Zona de paramo	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
11	Zona de paramo	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas sin aguas
11	Forestal protectora	Mixto	Vías malas	Zonas sin aguas
11	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
11	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
11	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías malas	Zonas sin aguas
11	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías buenas	Zonas con aguas suficientes
11	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías buenas	Zonas sin aguas
11	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
11	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
11	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
11	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías malas	Zonas sin aguas
11	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
11	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

11	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
11	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías buenas	Zonas con aguas suficientes
11	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías buenas	Zonas sin aguas
11	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
11	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
11	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas sin aguas
11	Forestal protectora	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Forestal protectora	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
11	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
11	Forestal protectora	Suelo desnudo	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Zonas suburbanas	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
11	Forestal protectora - productora	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Forestal protectora - productora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Forestal protectora	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
11	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
11	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Mixto	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
11	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
11	Zona de paramo	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
11	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

11	Susceptible de actividad minera	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
11	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
11	Susceptible de actividad minera	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Susceptible de actividad minera	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
11	Susceptible de actividad minera	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Susceptible de actividad minera	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
11	Susceptible de actividad minera	Suelo desnudo	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
12	Zona de paramo	Bosque	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
12	Zona de paramo	Bosque	Vías regulares	Zonas sin aguas
12	Zona de paramo	Bosque	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
12	Zona de paramo	Bosque	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
12	Zona de paramo	Bosque	Sin vías	Zonas sin aguas
12	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
12	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas sin aguas
12	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
12	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
12	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas sin aguas
12	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
12	Zona de paramo	Suelo desnudo	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
12	Zona de paramo	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
12	Zona de paramo	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas sin aguas
12	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
12	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías buenas	Zonas con aguas suficientes
12	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
12	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
12	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
12	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
12	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

12	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
12	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
12	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
12	Zonas suburbanas	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
12	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
12	Forestal protectora	Bosque	Vías regulares	Zonas sin aguas
12	Forestal protectora	Bosque	Vías malas	Zonas sin aguas
12	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Bosque	Vías malas	Zonas sin aguas
12	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
12	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
12	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
12	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Bosque	Vías regulares	Zonas sin aguas
12	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
12	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
13	Zona de paramo	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
13	Zona de paramo	Bosque	Vías malas	Zonas sin aguas
13	Zona de paramo	Bosque	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
13	Zona de paramo	Bosque	Vías regulares	Zonas sin aguas
13	Zona de paramo	Bosque	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
13	Zona de paramo	Bosque	Sin vías	Zonas sin aguas
13	Zona de paramo	Bosque	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
13	Zona de paramo	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
13	Zona de paramo	Mixto	Vías malas	Zonas sin aguas
13	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas con aguas suficientes

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

13	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas sin aguas
13	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
13	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
13	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
13	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
13	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
13	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas sin aguas
13	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
13	Zona de paramo	Suelo desnudo	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
13	Zona de paramo	Suelo desnudo	Vías malas	Zonas sin aguas
13	Zona de paramo	Suelo desnudo	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
13	Zona de paramo	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
13	Zona de paramo	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas sin aguas
13	Zona de paramo	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas con aguas abundantes
13	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
13	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías malas	Zonas sin aguas
13	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías regulares	Zonas sin aguas
13	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
13	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías buenas	Zonas sin aguas
13	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas sin aguas
13	Forestal protectora	Bosque	Vías malas	Zonas sin aguas
13	Forestal protectora	Bosque	Vías regulares	Zonas sin aguas
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Mixto	Sin vías	Zonas sin aguas
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Bosque	Vías malas	Zonas sin aguas
13	Áreas de infiltración para	Bosque	Sin vías	Zonas sin aguas

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

	recarga de acuíferos			
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Bosque	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Mixto	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Sin vías	Zonas sin aguas
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas sin aguas
13	Zona de paramo	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
13	Zona de paramo	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
13	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
13	Susceptible de actividad minera	Bosque	Vías malas	Zonas sin aguas
13	Susceptible de actividad minera	Bosque	Vías regulares	Zonas sin aguas
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Bosque	Vías regulares	Zonas sin aguas
13	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
9	Zona de paramo	Mixto	Sin vías	Zonas sin aguas
9	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
9	Zona de paramo	Suelo desnudo	Vías malas	Zonas con aguas suficientes

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

9	Zona de paramo	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
9	Forestal protectora - productora	Pastos y cultivos	Vías regulares	"Zonas con aguas escasas"
9	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
9	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
9	Uso agropecuario tradicional	Edificaciones y otras construcciones	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
9	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
9	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
9	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
9	Uso agropecuario tradicional	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
9	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
9	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
9	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
9	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
9	Uso agropecuario tradicional	Suelo desnudo	Sin vías	Zonas con aguas suficientes
9	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
9	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
9	Zonas suburbanas	Edificaciones y otras construcciones	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
9	Zonas suburbanas	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
9	Zonas suburbanas	Edificaciones y otras construcciones	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
9	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
9	Uso agropecuario semiintensivo o semimecanizado	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
9	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
9	Zona de paramo	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
9	Zona de paramo	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

9	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Bosque	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
9	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
9	Áreas de infiltración para recarga de acuíferos	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
9	Susceptible de actividad minera	Mixto	Vías buenas	Zonas con aguas abundantes
9	Susceptible de actividad minera	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
9	Susceptible de actividad minera	Pastos y cultivos	Vías buenas	"Zonas con aguas escasas"
9	Susceptible de actividad minera	Pastos y cultivos	Vías regulares	"Zonas con aguas escasas"
9	Uso agropecuario tradicional	Bosque	Vías malas	Zonas sin aguas
9	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas sin aguas
7	Uso agropecuario tradicional	Edificaciones y otras construcciones	Vías buenas	Zonas con aguas suficientes
7	Uso agropecuario tradicional	Edificaciones y otras construcciones	Vías buenas	Zonas con aguas abundantes
7	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
7	Uso agropecuario tradicional	Pastos y cultivos	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
7	Forestal protectora	Edificaciones y otras construcciones	Vías buenas	Zonas con aguas suficientes
7	Forestal protectora	Edificaciones y otras construcciones	Vías buenas	Zonas con aguas abundantes
7	Forestal protectora	Edificaciones y otras construcciones	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes
7	Forestal protectora	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
7	Forestal protectora	Mixto	Vías malas	Zonas con aguas abundantes
7	Forestal protectora	Mixto	Vías buenas	Zonas con aguas suficientes
7	Forestal protectora	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas suficientes
7	Forestal protectora	Mixto	Vías regulares	Zonas con aguas abundantes

Implementación de inteligencia artificial para la actualización de Zonas Homogéneas Físicas rurales...

7	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas suficientes
7	Forestal protectora	Pastos y cultivos	Vías malas	Zonas con aguas abundantes