



Vigilada Mineducación

**LA GEODIVERSIDAD COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANIFICACIÓN
TERRITORIAL Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN LA CUENCA DEL
RÍO RISARALDA, COLOMBIA.**

**GEODIVERSITY AS A TOOL FOR TERRITORIAL PLANNING AND
SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE RISARALDA RIVER BASIN, COLOMBIA**

ALEJANDRA RÍOS PETERS

Proyecto de Grado

Directora: María Isabel Marín Cerón

Asesores: Graciela Peters Guarín

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2023

RESUMEN

Avanzar en el conocimiento y la estimación de la geodiversidad implica desarrollar herramientas espaciales y cartográficas que puedan apoyar, de manera visual y cuantitativa, el análisis de la complejidad del medio abiótico. Generar aproximaciones y variaciones metodológicas que permitan caracterizarlo de una manera integral permite que este campo pueda desarrollar modelos más confiables y con un amplio fundamento teórico-práctico que terminen siendo utilizados en pro de la planeación del territorio, el desarrollo sostenible de la sociedad y la protección de los recursos naturales.

Este trabajo evidencia igualmente la necesidad de contar con insumos cartográficos fidedignos y congruentes con la realidad de las zonas de estudio para geoprocasar la información pues, al obtener una mejor clasificación, se tienen representaciones concretas y reales de la riqueza del medio abiótico en un espacio determinado. Por lo que este proceso investigativo busca comprender la amplia diversidad que sucede en la cuenca del Río Risaralda; desde el entendimiento geocientífico y a través de la cuantificación de la geodiversidad, que permita brindar elementos espaciales y cartográficos para el análisis y discusión de un componente ampliamente rezagado en la planeación territorial. Permitiendo tener información y datos que puedan ser la base para priorizar, direccionar esfuerzos y recursos para la protección y el ordenamiento de paisajes diversos y, en únicos como el de la zona de estudio de este proyecto.

Palabras clave: Servicios Geosistémicos, Sostenibilidad, Abiótico, Semicuantitativo, Índices Morfométricos.

ABSTRACT

Progress in the knowledge and estimation of geodiversity implies developing spatial and cartographic tools that can support, visually and quantitatively, the analysis of the complexity of the abiotic environment. The generation of methodological approaches and variations that allow an integral characterization of this field allows the development of more reliable models with a broad theoretical-practical basis that can be used for territorial planning, sustainable development of society and protection of natural resources.

This work equally evidences the necessity of having reliable cartographic inputs, congruent with the reality of the study areas, to geoprocess the information in order to obtain a better classification and reliable representations of the variety of the abiotic environment in a given space. Therefore, this research process seeks to understand the wide diversity that occurs in the Risaralda River basin, from the geoscientific understanding and through the quantification of geodiversity, allowing to provide spatial and cartographic elements for the analysis and discussion of a widely neglected component in territorial planning. Enabling having information and data that could be the basis for prioritizing, directing efforts and resources for the protection and management of diverse landscapes and, unique as the one of the study area of this project.

Keywords: Geosystem Services, Sustainability, Abiotic, Semiquantitative, Morphometric indexes.

DEDICATORIA

Estas páginas si bien son el resultado de una investigación académica, resumen a grandes rasgos la construcción como ser humano que he tenido en estos años de vida. A pesar de las terminologías y lenguajes técnicos que aquí se usen, realmente, este conocimiento encapsula una mirada llena de amor y de intriga por entender las interconexiones de este planeta y seres humanos tan complejos que lo habitan.

También es el resultado de la enseñanza principal de mi casa y mi Mamá, el buscar proteger este planeta que nos provee de todo pero que no ha sido cuidado como tal. Al igual que, encontrar la manera de que nuestro trabajo siempre aporte a la sociedad, porque los que nacimos con privilegio tenemos la obligación de devolver al mundo todo ese amor que por azar nos tocó, y al prójimo, darle las oportunidades que la vida no le dio.

Buscar enlazar conocimiento interdisciplinario solo es el resultado de haber crecido con una familia que me enseñó que el mundo tiene conocimiento infinito y estamos aquí para adquirir lo que más podamos, y a una Madre que me pidió ser la mejor en lo que yo deseara ser. Pero, más allá de eso, me enseñó las cosas importantes de la vida, me enseñó a disfrutar de un abrazo, de una flor, de un pájaro cantando en la mañana, de ver el atardecer, de amar y respetar a los animales y la naturaleza y agradecer el aquí y el ahora, me enseñó el amor incondicional, y que siempre vamos a estar vivas mientras vivamos en el corazón de la otra. Mamá, todos mis logros son para ti, por nuestros sueños y el amor que nos tenemos que es tan infinito y grande que trasciende todo el universo y sus dimensiones. Hoy estoy aquí dedicándote cada uno de mis logros que son agri dulces, pero son mi promesa de continuidad hacia ti, hacia ese amor que nos tenemos y hacia esos sueños que nos prometimos cuando disfrutábamos juntas la vida.

Beatriz Eugenia Peters Guarín, eres mi motor, mi corazón y mi vida, lo que yo logré en esta vida siempre será dedicado a ti, y será materializado gracias a tu amor puro e incondicional, y a tu esfuerzo diario en este mundo para darme hasta lo imposible

y lo incontable. Mi vida, mis sueños y todas mis obras siempre serán dedicadas a ese pedacito de cielo que la vida me dio como mamá y a ese ángel que me cuidará toda la vida, te amo infinitamente, sigues en mi corazón, en mi vida, en mis alegrías, en mis tristezas, en mis logros, en mis becas y en todo mi ser hasta que yo parta de este mundo e inclusive donde sea que vayamos a parar.

A mi familia y mis peludos también le dedico cada logro, porque cada paso que da una es un paso de las cuatro, seguimos caminando juntas unidas en el amor hoy y siempre.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo representa el cierre de una etapa altamente significativa y compleja de mi vida, el haber tenido la oportunidad de soñar hasta el infinito con mi vida y lo que quería de ella es gracias mi pequeña familia. El agradecimiento más grande de mi vida y de todos mis logros siempre será para mi Mamá Beatriz Eugenia Peters que siempre me apoyo en todas mis locuras y decisiones, y claramente siempre creyó que yo sería capaz de lograr todo lo que me propusiera en la vida, nunca existió un límite en nuestros sueños y este trabajo es el resultado de eso y de nuestro amor tan grande, te amo y agradezco siempre Mamá. Agradecer la valentía de la mujer que lidero nuestro hogar, mi Abuela, y su sacrificio desde temprana edad para que sus hijas tuvieran una vida con posibilidades, y más adelante brindarle a su única nieta todo lo que fuera soñable y posible, gracias, María Rubiela Guarín Cedeño. A mi Tia, Graciela Peters Guarín, porque me ha enseñado la entereza que hay que tener en esta vida que es muy difícil, que el carácter fuerte y la disciplina para forjar a los que amamos también es una forma de amor, y especialmente por abrir tu conocimiento y formación profesional a una persona que apenas inicia su trayectoria pero que sabe que cuenta contigo. A mis gatos y perros, porque han sido el amor puro e incondicional que la vida me presto.

Unas páginas no logran darme el espacio suficiente, pero los amigos que se han convertido en mi familia durante los últimos diez años de mi vida tienen estos renglones llenos de agradecimiento porque su apoyo y amor incondicional durante estos últimos 2 años de vida y toda su amistad han sido fundamental para que yo haya decidido asumir el reto de seguir viviendo con el corazón a pedazos, pero que este hoy, aquí, dando las gracias y luchando por lo que deba vivir en este planeta es por su apoyo y amor, mil y una vez gracias por estar y permanecer.

A mi directora de proyecto y tutora María Isabel Marín Cerón porque me abrió las puertas cuando el mundo me las cerraba, y creyó que podía afrontar ese mundo que se estaba cayendo a pedazos y podría asumir mi vida con el apoyo de su

paciencia y conocimiento en mi proceso profesional, siempre estaré en deuda contigo. A todos los docentes que me enseñaron que es más importante ser una persona íntegra que tener títulos, gracias. A la Universidad EAFIT por confiar, apoyarme y darme oportunidades para seguir adelante y sacar mi proyecto profesional adelante. Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia por la financiación de estos procesos investigativos que buscan ser íntegros con el conocimiento, por confiar en este proyecto y los amplios frutos que estamos obteniendo.

A la persona que lea este documento y le sirva para su vida profesional o personal, gracias por darme la oportunidad de mostrarle un poco de mi conocimiento.

A la música y el arte que me mantuvieron en los momentos de oscuridad.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
2. GENERALIDADES	12
2.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	12
2.2. JUSTIFICACIÓN	12
2.3 HIPÓTESIS	13
2.4. OBJETIVO GENERAL.....	13
2.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. ZONA DE ESTUDIO	14
4. MARCO CONCEPTUAL	17
5. METODOLOGÍA	19
5.1 CONFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS	19
5.1.1. Generación de cartografía base.....	20
5.1.2. Obtención de cartografía base.....	23
5.1.3 Inventario de lugares de interés geológico (LIG).....	26
5.2 ESTIMACIÓN DE LA GEODIVERSIDAD POR MÉTODO ESTADÍSTICO ..	27
5.3 ESTIMACIÓN DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS.....	28
6. RESULTADOS.....	29
6.1 CONFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	29
6.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA.....	32
6.2.1 Inventario de lugares de interés geológico (LIG).....	32
6.2.2 Estimación de la geodiversidad por método estadístico.....	32
6.2.3 Subíndices.....	34

6.2.4. Estimación de índices morfométricos.....	34
6.2.5 Estimación final de índice de geodiversidad total.....	36
7. DISCUSIÓN.....	38
7.1 GEODIVERSIDAD ORIENTADA HACIA LOS SERVICIOS GEOSISTÉMICOS.....	42
7.2 RELACIÓN GEODIVERSIDAD, BIODIVERSIDAD Y MODELOS DE DESARROLLO TERRITORIAL.....	44
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS	48
ANEXOS.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la cuenca del Río Risaralda	15
Figura 2. Flujograma metodológico para obtención de índices morfométricos.....	29
Figura 3. Mapa Geológico 1:25.000.....	30
Figura 4. Mapa Geomorfológico 1:25.000.....	31
Figura 5. Mapa de Geodiversidad en superficie Kriging.....	33
Figura 6. Mapa de índices morfométricos	35
Figura 7. Mapa propuesto de geodiversidad total.....	37
Figura 8. Gráfico de servicios geosistémicos.....	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Recopilación bibliográfica de apariciones fosilíferas.....	23
Tabla 2. Diagrama de rosas de las litologías principales.....	25

INTRODUCCIÓN

La Geodiversidad, entendida como “la variedad de registros geológicos, rocas, sedimentos, minerales, fósiles, suelos y formas del terreno, junto con los procesos naturales que los forman y alteran, constituye la base del valor ecológico [...] y el conocimiento de los procesos físicos naturales que en ellos acontecen” (Gobierno Vasco, 2020), es la encargada de proveer los cimientos para el medioambiente, la sociedad y por ende su desarrollo económico, cultural, social y político. Estimar su potencial en una cuenca y clasificar según Gray (2019) sus Lugares de Interés Geológico (LIG) permite explicar al medio abiótico como una fuente limitada de recursos y activos que requieren protección y manejo especial como la geoconservación.

Los trabajos de investigación que ayuden a cuantificar las características de este medio permiten proponer modelos que representen de manera gráfica su distribución espacial, y evidencian la necesidad de establecer una comprensión integral del territorio. Fomentando así el dialogo entre estrategias y mecanismos que conviertan los procesos abióticos en la base sobre la cual se sustente la gestión del territorio, que vayan desde la investigación en la academia hasta planes sostenibles de desarrollo a nivel nacional a municipal, involucrando las autoridades y generando acciones que permitan aprovechar de forma sostenible el potencial abiótico de regiones como la Cuenca del Río Risaralda en el Departamento de Risaralda, Colombia, objeto de estudio del actual proyecto.

Este trabajo de grado busca generar conocimiento que aporte y permita avanzar en el entendimiento de la interconexión entre la Geodiversidad, como la base de la Biodiversidad, y los servicios que de este conjunto se derivan tanto para el medioambiente como para la sociedad que se beneficia del mismo. Enmarcado en una propuesta investigativa para el programa de *becas-pasantías* del *Ministerio de Ciencia, Tecnología e Investigación de Colombia* y con apoyo de la *Vicerrectoría de Investigación de la Universidad EAFIT* hace parte de un proceso investigativo que

se apoya de una mirada interdisciplinaria para identificar modelos de sostenibilidad existentes y potenciales para los servicios geosistémicos de la cuenca. Por lo anterior, se hace necesario definir la geodiversidad y cuál es su papel dentro de las dinámicas existentes en la cuenca del río Risaralda, es allí donde este proyecto de grado hace parte de los aportes al conocimiento que se buscan desarrollar en todo el marco investigativo.

2. GENERALIDADES

2.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Como la geodiversidad puede ser una herramienta de planeación sostenible del territorio?

2.2. JUSTIFICACIÓN

Para poder articular el medio abiótico con la biodiversidad es necesario entender los procesos que en él se conjugan; al investigar y comparar diferentes aproximaciones de cuantificación de la Geodiversidad desde la academia se busca generar productos que permitan seguir avanzando en esta área del conocimiento que tiene como objeto primario la gestión del territorio. La generación de representaciones gráficas, como recursos cartográficos, apoya el avance en la investigación de herramientas que asistan el dialogo entre actores, la visualización de los potenciales del territorio y complementen los planes de desarrollo. La finalidad de estos proyectos investigativos a largo plazo es poder asociar el medio

abiótico como el eje y pilar de la biodiversidad y por ende de los servicios que de allí se derivan. Por lo que el fin último es establecer rutas y acciones participativas que constituyan un recurso integrador para la planeación y ordenamiento territorial cuya columna vertebral sea la Geodiversidad. Adicionalmente, los resultados de estos procesos investigativos brindan materiales adecuados para la discusión entre actores y la trasmisión social del conocimiento. Involucrando entonces a la sociedad dentro del análisis del territorio y acercándola a la protección de un recurso limitado, como lo es el medio abiótico, para establecer procesos de sostenibilidad en el mismo.

2.3. HIPÓTESIS

La cuantificación por un modelo semicuantitativo del medio abiótico permite aproximarlos como generador de los servicios geosistémicos y sustento de la biodiversidad en la cuenca del río Risaralda.

2.4. OBJETIVO GENERAL

Estimar la Geodiversidad mediante el uso de una metodología semicuantitativa, implementando una comprobación cartográfica a nivel geológico y geomorfológico en escala 1:25.000 para la zona de estudio que permita mayor exactitud en la modelación, al igual que establecer una categorización de los servicios geosistémicos a través de los Lugares de Interés Geológico (LIG) de la cuenca para la planeación sostenible del territorio.

2.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Comprobar la cartografía geológica y geomorfológica preexistente de la cuenca con base en datos de campo, teledetección e información primaria.
2. Generar una Geodatabase (GDB) sobre los componentes de la Geodiversidad, utilizando herramientas de SIG para extracción automática de elementos que caracterizan el territorio.
3. Establecer Lugares de Interés Geológico que permitan categorizar los Servicios Geosistémicos y corroborar la metodología de cuantificación de la geodiversidad de la cuenca y los beneficios proporcionados por el medio abiótico a la sociedad.
4. Implementar un modelo semicuantitativo para la estimación de la geodiversidad.

3. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica del río Risaralda, se encuentra ubicada en el centro-occidente de Colombia, hace parte de los departamentos de Risaralda y Caldas, limita al norte con el departamento de Antioquia, al occidente con el departamento del Chocó, al sur con el Valle del Risaralda y al occidente con el departamento de Caldas. Dicha cuenca tiene un total de 125.600 hectáreas (Ha) y 185.929 habitantes (CARDER et al., 2017) con una comunidad pluriétnica que involucra comunidades indígenas, afrodescendientes y rurales. Esta zona se encuentra ubicada a nivel geopolítico en 14 municipios estos son: Guática, Riosucio, Anserma, Viterbo, San

José de Caldas, Risaralda, Belalcázar pertenecientes a Caldas y Mistrató, La Celia, Belén de Umbría, Santuario, Apía, Balboa y la Virginia de Risaralda (ver **figura 1**).



Figura 1. ubicación cuenca Río Risaralda Tomado de la ONU OCHA en GIFEX (2023), modificado con polígono de área de estudio.

Sus características fisiográficas se vinculan a su relación con las vertientes orientales de la Cordillera Central donde se encuentra ubicada la divisoria de aguas entre la cuenca Cauca y Risaralda hogar de los municipios de Belalcázar, San José, Anserma, Guática y Riosucio. Al igual que la vertiente occidental de la Cordillera Occidental que permite la existencia de unidades: cuchillas del San Juan, Yarumal, Memémbora, Parrupa-Humacas, con dirección Norte-Sur, a excepción de la cuchilla Caramanta que se dispone Este-Oeste (E.O.T., 1999 citado en Hincapié et al., 2011); dichas geofomas conforman un escarpe de línea de falla siguiendo la falla

Mistrató que cruza en sentido NNE-SSW y limitan algunos bloques Litológicos (Hincapié et al., 2011) que se extiende al Valle del Risaralda y Cerro Tamana y Tatamá siendo la divisoria entre las cuencas Risaralda y San Juan en el Chocó.

De igual manera, al norte de la cuenca sobre los 3750 m.s.n.m. en el Alto del Morro Placho nace el río Risaralda, el cual recorre un trayecto de 95 km de norte a sur que termina desembocando en la cuenca del Río Cauca a la altura del municipio de la Virginia a 896 m.s.n.m. Si bien esta cuenca posee múltiples tributarios los principales son el río Guática, Chapatá, Mapa y el Totuí (CARDER et al., 2017).

Un factor que condiciona las características de la cuenca es la gran cantidad de fallas que termina afectando y condicionando la red hidrográfica de la misma. La zona de estudio cuenta con una serie de valles confinados a lo largo de sus principales ríos, sobresaliendo el Valle de Umbría. Hacia el sur la geomorfología contrasta con respecto al norte, presentando topografía suave, grandes llanuras aluviales formadas por el Río Risaralda y colinas redondeadas que son cortadas bruscamente al occidente por la cordillera occidental y al oriente por la cordillera central.

Siendo una cuenca con alta influencia por el Chocó biogeográfico presenta múltiples procesos climáticos, entre ellos dos periodos de relativa sequía y dos húmedos, lo cual corresponde a un régimen de precipitación tipo ecuatorial (bimodal) con influencia mitigada de los alisios norte que penetran en la región desde el Chocó por el boquerón que corta la Cordillera Occidental entre los cerros Tatamá y Caramanta (CARDER et al., 2017).

4. MARCO CONCEPTUAL

Para lograr desarrollar este trabajo de investigación y la aproximación cartográfica que en él se propone, es importante resaltar ciertos conceptos que terminan siendo la base para la construcción de la geodiversidad. Es necesario mencionar que el Occidente Colombiano presenta un contexto geológico muy complejo que viene dado por “confusos bloques tectónicos altamente deformados que impiden realizar una interpretación segura de los ambientes y mecanismos de formación que los controlaron” (Hincapie, 2002). Sin embargo, dentro de los procesos de entendimiento de su evolución geológica se tiene que, dentro del marco regional y de los procesos de deformación y evolución geológica, dicha evolución guarda relación con el contexto de convergencia de las Placas Nazca, el Bloque Andino, y la Placa de Sur América, a lo que se suman en su formación más reciente, los Bloque Panamá- Chocó y la Placa Caribe (CARDER et al., 2017)

Para la zona de estudio resulta relevante la influencia del denominado Bloque Panamá-Chocó, especialmente para la evolución de la Cordillera Occidental en general, y la formación de la cuenca del Río Risaralda en particular; así como el “límite occidental del Bloque Andino, que corresponde a las Fallas del Sistema Cauca-Almaguer” (Ingeominas, 2001) el cual de manera regional se conoce como la Falla Quebradanueva. Por lo anteriormente mencionado se registran en la cuenca del Río Risaralda unidades litológicas desde el Cretácico, Paleógeno, Neógeno y Cuaternario.

Cabe resaltar también que en este trabajo se adopta la definición de geodiversidad como: “la variedad de registros geológicos, rocas, sedimentos, minerales, fósiles, suelos y formas del terreno, junto con los procesos naturales que los forman y alteran, constituye la base del valor ecológico [...] y el conocimiento de los procesos físicos naturales que en ellos acontecen” (Gobierno Vasco, 2020) y la definición de Gray (2004) para el medio abiótico como: “el rango natural de diversidad de rasgos

geológicos (rocas, minerales y fósiles), geomorfológicos (formas del terreno y procesos) y suelos, incluyendo sus relaciones, propiedades, interpretaciones y sistemas”.

Para el desarrollo de este proceso investigativo es relevante comprender que la geodiversidad se encuentra compuesta por “una serie de entidades físicas finitas que serán rasgos geológicos concretos (afloramientos, formas del terreno, elementos unitarios, agrupaciones de ellos, etc.) ... la geodiversidad puede ser medida y valorada en un territorio y ser comparada con la de otras áreas” (Carcavilla et al., 2008). Fundamento base usado para proponer un modelo semicuantitativo para la geodiversidad presente en la cuenca del Río Risaralda.

Se comprende y apoya de igual manera que “el estudio de la geodiversidad consistirá en analizar los componentes que definen la diversidad... de una región, de cara a poder establecer índices e indicadores, y posibilitar la comparación entre áreas diferentes” (Carcavilla et al, 2008).

El estimar su potencial en una cuenca lleva a identificar, entender y clasificar los Lugares de Interés Geológico (LIG) entendidos como “aquellos lugares que por su exposición y contenido resultan especialmente adecuados para reconocer e interpretar los procesos geológicos que han intervenido en las etapas evolutivas de una localidad” (Servicio Geologico Minero Argentino, 2019) y según lo propuesto por Gray, 2019 estos LIG podrán ser catalogados como servicios geosistémicos definidos como “los bienes y servicios que contribuyen al bienestar humano resultantes específicamente del subsuelo” (Van Ree et al., 2016 citado en Frisk et al., 2022).

Los LIG, su ubicación, análisis y clasificación al igual que el desarrollo de herramientas de cuantificación y visualización de la geodiversidad facilitan y enriquecen la gestión del territorio. Por ello, desde la academia se deben generar herramientas que faciliten su inclusión en la discusión y análisis de propuestas para el desarrollo y ordenamiento del territorio, y que igualmente faciliten o generen

acciones participativas y de trasmisión de conocimiento que permitan aprovechar de forma sostenible el potencial de distintas regiones como la Cuenca del Río Risaralda en el Departamento de Risaralda, Colombia objeto de estudio de la pasantía de investigación en el marco de Jóvenes Investigadores para el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

5. METODOLOGÍA

5.1. CONFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS

La cuantificación de la geodiversidad por un modelo semicuantitativo del medio abiótico permite aproximarla como uno de los sustentos de la biodiversidad y generador de los servicios geosistémicos que proveen a la sociedad. Para implementar un modelo que permita generar su estimación, como los que se han venido desarrollando en el área de la geodiversidad ya sea el de Pereira et al. (2013) o, para este caso de estudio, el código python de Valentín (2021) es necesario conformar una base de datos con características del medio abiótico que permitan desarrollar la cuantificación de la geodiversidad de la zona. Por lo anterior, se procedió a adquirir información preexistente por diferentes autoridades nacionales como la encontrada en la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), y del Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas (POMCA) de la Cuenca del Río Risaralda. En dicha Geodatabase (GDB) se encontraron múltiples mapas e información en escala 1:25.000 de la cuenca adoptados a su vez por el POMCA desde otras entidades nacionales como:

- *Unidades Geológicas* – Servicio Geológico Colombiano (SGC) planchas 1:100.000: 205 Chinchiná, 185 Riosucio y 204 Pueblo Rico. (ver anexo 1)

- *Unidades Geomorfológicas*: IGAC con criterios edafológicos del POMCA (ver anexo 2).
- *Lineamientos y estructuras*- Servicio Geológico Colombiano (SGC) y recopilación bibliográfica del POMCA.

Al generar una corroboración detallada de dicha base de datos de manera individual y con ayuda de los asesores del proyecto se pudo observar que esta información no era completamente fidedigna a las características del área de estudio. Por lo cual, se hizo necesario apoyarse de la financiación que brindó el *Ministerio de Ciencia, Tecnología e Investigación* y la *Universidad EAFIT*, a través del programa de *Jóvenes Investigadores*, para todo el proyecto de investigación y el establecimiento de tres (3) campañas de campo (ver anexo 14) que permitieron generar información con la cual posteriormente, y apoyado en la interpretación de sensores remotos, se pudo obtener un modelo de geodiversidad más exacto. La campaña de campo se llevó a de la siguiente manera: dos salidas de campo para cartografía base y una salida de campo para servicios geosistémicos.

5.1.1. Generación de cartografía base

Para poder construir la cartografía del área de estudio se recurrió al marco conceptual desarrollado en el entendimiento de la evolución geológica de la zona donde se consideran específicamente los avances y aportes generados por los Geólogos: Daniel Hincapié, Andrés Felipe Salazar y la Doctora Luz Mary Toro de la Universidad de Caldas, los cuales desde el 2002 proponen que en la parte Occidental del área afloran rocas “deformadas dúctilmente, producto del metamorfismo de falla asociado a la Falla Mistrató, originando protomilonitas, milonitas y ultramilonitas que se formaron bajo condiciones metamórficas de grado bajo - medio, a temperaturas entre 500°C -700°C y profundidades mayores de 15 Km” (Hincapié et al., 2011).

De igual manera se adopta la diferenciación que establece dicho grupo de geólogos, de lo que el Servicio Colombiano de Geología nombra el Plutón de Mistrató y es descrito y diferenciado por Hincapié et al. (2011) donde explican que la parte noroccidental de la cuenca del Río Risaralda se encuentra caracterizada por un “dominio de cuerpos gabroícos que varían de microgabros a gabros, compuestos por plagioclasa (labradorita), piroxeno ± hornblenda pertenecientes a la serie toleítica que presenta afinidad oceánica, y ha sido relacionada con el terreno oceánico de la Cordillera Occidental”.

De igual manera este grupo de investigación propone que en el centro de la cuenca del Río Risaralda afloran “rocas ácidas que varían desde cuarzdioritas a granodioritas con predominio de la fase tonalítica. La mineralogía consta de cuarzo, plagioclasa (andesina) ± hornblenda ± biotita ± feldespato potásico” (Hincapié et al., 2011).

Al nororiente de la cuenca el “cuerpo ígneo ácido instruye al Gabro de Anserma formando una pequeña aureola de contacto” (Hincapié et al., 2011), apoyando entonces su teoría evolutiva y a los resultados geoquímicos que proponen que las rocas caracterizadas pertenecen a la serie calcoalcalina y fueron formadas en un cinturón magmático durante el Paleógeno.

Para poder generar una corroboración cartográfica que permitiera evidenciar en campo los procesos y mapa descritos por Salazar (2011) y determinar la exactitud del resto de la cartografía presentada en el POMCA/SGC se establecieron dos salidas que se desarrollaron de la siguiente manera para lograr el alcance del trabajo de grado:

-Salida de campo 1- Caracterización geológica con acompañamiento de PhD. Maria Isabel Marín: llevada cabo en junio 13, 14 y 15 de junio del 2023 con un recorrido de norte a occidente de la cuenca, occidente a sur, y suroccidente de la cuenca (ver anexo 14). La cual involucró el refinamiento de contactos entre unidades litológicas,

corroboración de litologías propuestas por Hincapié (2002), Hincapié et al. (2011) y Salazar (2011), descritas en otras instancias del proyecto en la aplicación *Avenza*.

-Salida de campo 2- Caracterización Geomorfológica con acompañamiento de PhD. Graciela Peters Guarín: en las fechas 9 y 10 de julio del 2023, con un recorrido que involucro todo el occidente de la cuenca hasta el sur de la misma, de sur a noroccidente y de noroccidente a nororiente (ver anexo 14) lo cual permitió la descripción detallada de las unidades geomorfológicas presentes en la zona, el refinamiento de ubicación de unidades propuestas en la plancha geomorfológica 185-Riosucio, la identificación de las Sedimentitas de Puente Umbría propuestas por Moreno-Sánchez et al. (2022) y evidencias de evolución del paisaje vinculadas a los ambientes-geomorfológicos, descritas en aplicación *Avenza*.

Con el desarrollo de los procesos anteriores, adicionando trabajo de teledetección y fotointerpretación guiado por los parámetros establecidos en el libro *Fotogeología Práctica* por Naranjo (2015). En programas como: *Google Earth Pro*, *Google Maps*, *ArcGIS Pro 3.1* con el polígono de la cuenca, e insumos obtenidos a partir del DEM de resolución 12.5 del satélite espacial Alos Palsar (NASA, 2013) (ver anexo 10) , como capas de sombras (ver anexo 11) y aspecto (ver anexo 12), y parámetros vinculados a las características del terreno y la red de drenaje se procedió a refinar los contactos geológicos y delimitar con base a el mapa de Hincapié (2002) (ver anexo 9), con base a lo propuesto en el anexo 15 (flujograma metodológico cartografía), estableciendo la propuesta final de mapa geológico con escala 1:25.000 presentada en la **figura 3**.

De igual manera se procedió para el análisis y mapa geomorfológico, con los insumos mencionados anteriormente, tomando también de base la información de la plancha geomorfológica 185 Riosucio (Servicio Geológico Colombiano, 2014) y el trabajo de campo se proponen 33 sub-unidades geomorfológicas en escala 1:25.000 como se observa en la **figura 4**. Consecuentemente, al tener una mayor claridad sobre los procesos vinculados a la cuenca del Río Risaralda, las unidades litológicas que en ella afloran y geomorfología asociada se procede a generar,

mediante recopilación bibliográfica de apariciones fosilíferas como se observa en la **tabla 1**, el mapa paleontológico en la misma escala (ver anexo 4).

Formaciones con fósiles	Apariciones fosilíferas datadas en publicaciones.
Formación zarzal	Diatomitas, arcillolitas y arenas tobáceas (Díaz, 2015).
Formación Barroso	Macrofósiles del Aptiano-Albiano (<i>Ptychoceras</i> sp., y <i>Metahamites</i> sp.) y microfósiles de la misma edad como <i>Globigerinella escheri</i> (Kauffman) y <i>Ruboglovisgerina</i> sp. (Etayo et al. 1980 en Díaz, 2015).
Formación penderisco: miembro urrao	Tope de las capas ichnofósiles del ichnogénero <i>Ophiomorpha</i> (Díaz, 2015) Fauna microfósil del cretácico tardío al Paleoceno (Bourgeois et al., 1983 en Díaz, 2015) (Duque-Caro, 1989), foraminíferos planctónicos trocoespirales de tamaño pequeño no quillados y foraminíferos grandes con enrollamiento trocoespiral que presentan dos quillas en las biomicritas y en las capas de chert se encontraron radiolarios (Díaz, 2015).
Formación Cañas gordas	Liditas asociadas con cuerpos lenticulares (Díaz, 2015).
Formación la Paila	Arenitas tobáceas con restos de plantas principalmente hojas de helechos (<i>Thelypteris</i> sp) rica flora fósil asociada en las que se hallaron hojas de angiospermas afectadas por agallas de insectos. También se presentan otros efectos de insectos sobre las hojas, como el minado sinuoso, y pistas de alimentación marginal y no marginal (Díaz, 2015).
Formación amagá	Gasterópodo (Miembro superior de la formación Amagá (Paez-Acuña, 2013), (Grosse, 1926 en Paez-Acuña, 2013), (Guzmán y Sierra, 1984 en Paez-Acuña, 2013). Contenido palinológico con granos de polen (<i>Retricolporites "planopolaris"</i>), esporas de tipo monolete y tilete y fructificaciones de hongos de la familia <i>Microtiraceae</i> y fitoclastos (Paez-Acuña, 2013).
Sedimentitas de Puente Umbría	Arenitas lodosas laminadas y conglomerados arenosos macizos con bioclastos y fragmentos de basaltos. La comunidad supramareal está representada por restos de troncos y hojas (<i>Dicotylophylum</i> sp.). Gastrópodos del tipo <i>Patella-Fisurella</i> y <i>Litorina</i> son los representantes de la zona intermareal. Corales escleractínidos y pelecípodos sugieren fondos oxigenados en la zona submareal. <i>Pachydiscus</i> sp. y otras amonitas son los únicos representantes de la zona pelágica (Moreno- Sánchez et al., 2002).

Tabla 1. Recopilación bibliográfica propia de apariciones fosilíferas en las formaciones litológicas que hacen parte de la cuenca del Río Risaralda.

5.1.2. Obtención de cartografía base

A partir de la información cartográfica encontrada en la GDB del POMCA se procedió a extraer insumos que poseían mayor cantidad y mejor calidad de información para usarse en la cartografía base en escala 1:25.000, como:

- Suelos- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2013) ver anexo 3.

- Zonificación Climática – IDEAM (2017), ver anexo 8.

De la página de la Agencia Nacional de Minería se obtuvo el mapa con información de las licencias mineras otorgadas a 2017 en el área de la cuenca, usado como aproximación de ocurrencias minerales en la zona de estudio (ver anexo 5). Para la extracción automática de información del terreno se usaron herramientas de alta precisión, como se puede apreciar en el flujograma (ver anexo 16), obteniendo a través del DEM 12.5 la red de drenaje en orden Strahler.

Para los lineamientos automáticos se obtuvieron 8 mapas de sombras con diferentes ángulos de incidencia según la metodología (ver anexo 16) que permitieran visualizar las diferentes estructuras de la región, posteriormente con el software *Catalyst* se utilizó el código *Lineament Extraction* para establecer capas de comportamiento, y se refinó en *QGIS* una capa total (eliminando el ruido y aproximaciones erróneas como los bordes). De igual manera, se obtuvieron diagramas de rosas para las litologías principales que permitieran entender, a grandes rasgos, el comportamiento estructural de la zona (ver **tabla 2**) donde se observa una tendencia de NW-SE con presencia poco estudiada de tendencias NE-SW.

Finalmente se genera una Geodatabase en *ArcGIS Pro 3.1* llamada *Cuenca del Río Risaralda* que tiene la recopilación de datos sobre la caracterización del medio abiótico y será usada como insumo para el procesamiento de la geodiversidad.

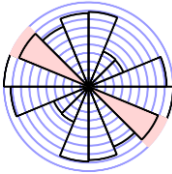
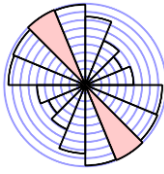
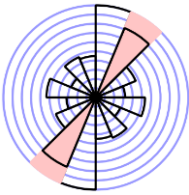
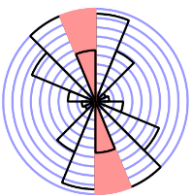
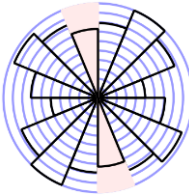
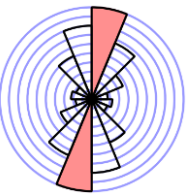
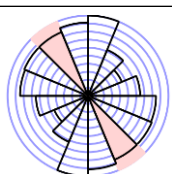
Formación	Cantidad de estructuras	Diagrama de Rosas
Formación barroso	1691	
Formación Penderisco-Miembro Urrao	1589	
Gabro de Anserma	317	
Cuarzodiorita	217	
Granulita	150	
Valles Confinados	192	
General	4351	

Tabla 2. Diagramas de rosas de estructuras en litologías relevantes en la cuenca del río Risaralda, autoría propia en software QGIS y Excel.

5.1.3 Inventario de lugares de interés geológico (LIG)

Con base a la definición brindada por Gray (2019) sobre los LIG, y entendiendo que dicho inventario permite la corroboración de los procesos de cuantificación de la Geodiversidad, se procede entonces a generar una base de datos en Excel con la información que se encuentra en línea sobre el área de estudio, principalmente en programas como Google Earth Pro y Google Maps estableciendo una metodología para esto (ver anexo 17). Esta información se categoriza con base a *código, nombre, coordenada X, coordenada Y, descripción (si aplica), servicio geosistémico según Gray (2019) (ver anexo 18) como son: Soporte, Regulación, Provisionamiento, Cultura y Conocimiento; e imagen de referencia (si aplica) (ver anexo 34).*

Con dicha recopilación se procede a convertir las coordenadas en grados, minutos y segundos para ingresar la información a *ArcGIS Pro-3.1* y obtener una capa de puntos con atributos que permita generar un mapa con cinco clasificaciones basadas en los servicios geosistémicos de dichos LIG en la cuenca del Río Risaralda.

Con este resultado se hace la tercera salida de campo que tiene como objeto:

- *Salida de campo 3 - Caracterización de servicios geosistémicos-acompañamiento Ms. Beatriz Eugenia Peters Guarín:* desarrollada en las fechas 8 y 9 de septiembre del 2022 permitió determinar a grandes rasgos los servicios geosistémicos de la zona y corroborar los LIG de la zona suroccidente, aportando adicionalmente nuevos lugares cartografiados en la aplicación *Avenza* que posteriormente fueron adicionados a la base de datos (ver anexo 14).

5.2 ESTIMACIÓN DE LA GEODIVERSIDAD POR MÉTODO ESTADÍSTICO

Estimar la geodiversidad por una metodología ampliamente aceptada como lo es la estadística hace necesario atender a las “dos propiedades estadísticas de cualquier mezcla de objetos: 1) el número de diferentes tipos de objetos (denominados clases) que se encuentran mezclados en la muestra; y 2) el número o la abundancia relativa de cada una de esas clases” (Carcavilla et al., 2008). Por dicha razón la geodiversidad, que se encuentra compuesta por múltiples objetos de diferentes clases, permite su cuantificación estadística involucrando además “la distribución espacial de los objetos y las relaciones entre ellos” (Carcavilla et al., 2008).

Con base a lo anterior, y teniendo en cuenta las diferentes aproximaciones cuantitativas en el campo de la geodiversidad, este trabajo de grado se adapta a la desarrollada por Valentin (2021) la cual, a grandes rasgos, es una recopilación de 14 metodologías, de diferentes autores, que busca incorporar y cuantificar la geodiversidad de una manera integral. Por esto, al obtener una GDB con los elementos abióticos, establecidos como necesarios (cartografía: geológica, geomorfológica, hidrológica, climática, estructural, pedológica, ocurrencias minerales/títulos mineros y paleontológica) se procede a utilizar el software ArcMap para abrir el código Python (Valentín, 2021) con la interfaz que permite establecer los parámetros de recuento (mediante la cuadrícula de 600m²) en el caso de este trabajo son:

- Geología- *Nombre de la unidad litológica (figura 3).*
- Geomorfología- *Tipo de relieve (figura 4).*
- Suelos- *Nomenclatura IGAC. (ver anexo 3).*
- Paleontología- *Nombre de la unidad litológica con aparición fosilífera (ver anexo 4).*
- Ocurrencias Minerales/Títulos Mineros: *Nombre otorgado por la ANM al título minero (ver anexo 5).*
- Drenajes- *Orden de drenaje según Strahler (ver anexo 6).*

- Lineamientos y estructuras: *NA, ya que todas las estructuras no tienen nombre (ver anexo 7).*
- Zonificación Climática: *Nombre. (ver anexo 8).*

Esta metodología contempla la división del territorio mediante una cuadrícula cuyo tamaño fue de 600 m² para cartografía temática escala 1:25.000, al igual que el polígono de la cuenca obtenido del POMCA. Con lo anterior se procede a correr la herramienta de Valentín (2021) donde se tomarán en cuenta la aparición (o no) de las 8 variables abióticas para realizar el cálculo del índice de geodiversidad en coordenadas proyectadas *MAGNA COLOMBIA OESTE*.

5.3 ESTIMACIÓN DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS

Para la clasificación geomorfométrica se utilizaron entonces índices contemplados como los más relevantes por un panel de Geólogos expertos conformado por: María Isabel Marín Cerón, Miguel Ramírez y el experto en SIG Juan Jose Montoya utilizando una modificación del modelo de Argyriou et al. (2016) generada por Ramírez (2022). Para obtener dichos índices se usaron procesamientos en el modelo digital de elevación DEM (ver **figura 2**) generando 6 índices diferentes que se sumaron con la propuesta establecida por dicho panel.

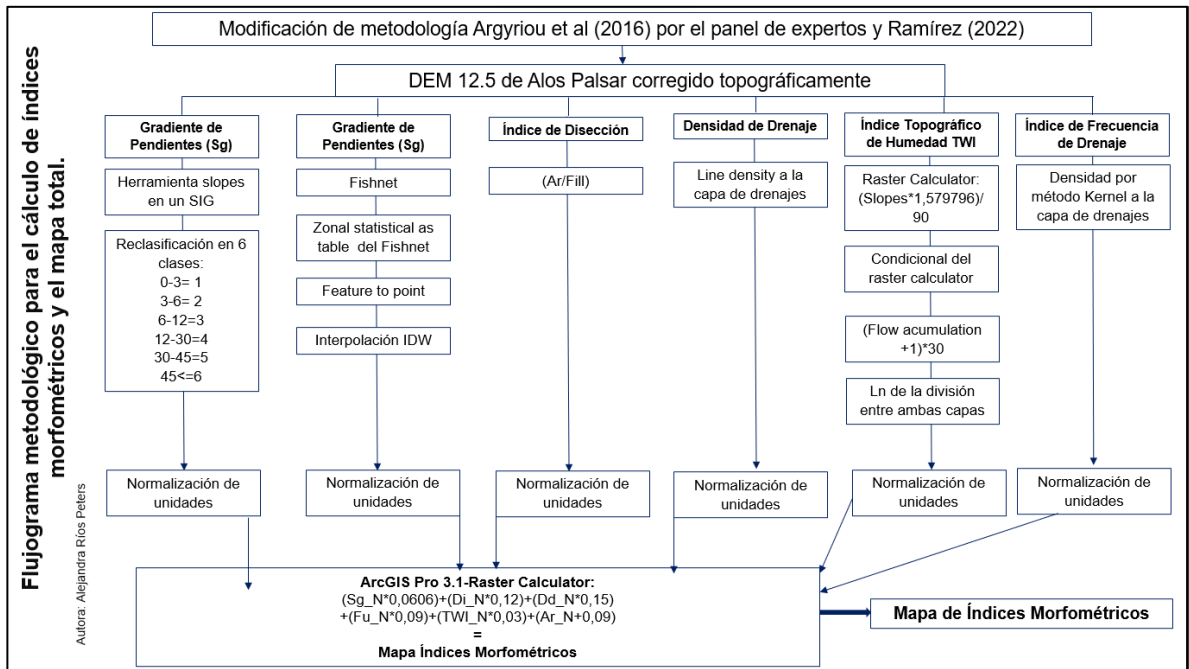


Figura 2. flujograma metodológico para obtención de índices morfométricos, autoría propia.

6. RESULTADOS

6.1 CONFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Gracias a la corroboración de la base de datos y a las salidas de campo que se debieron implementar en este trabajo se llegó a las propuestas para la cartografía base geológica y geomorfológica de este trabajo de grado (ver **figuras 3 y 4** respectivamente). Lo cual permite mejorar la definición de los caracteres abióticos.

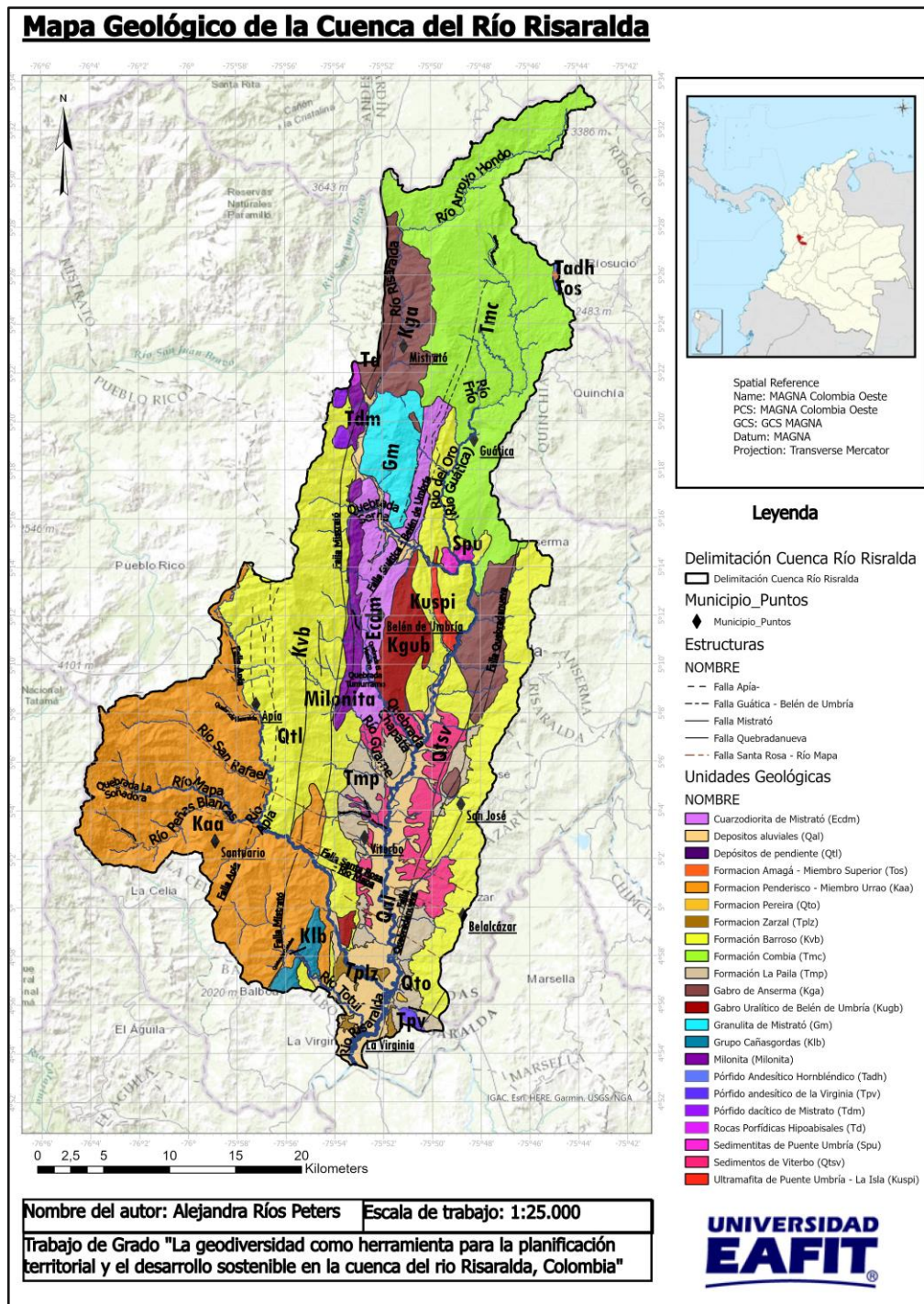


Figura 3. Mapa geológico 1:25.000, resultado de recopilación bibliográfica, teledetección y campo, autoría propia.

presentes en la zona de estudio y en consecuencia reflejar mayor detalle en los cálculos de geodiversidad posteriormente generados.

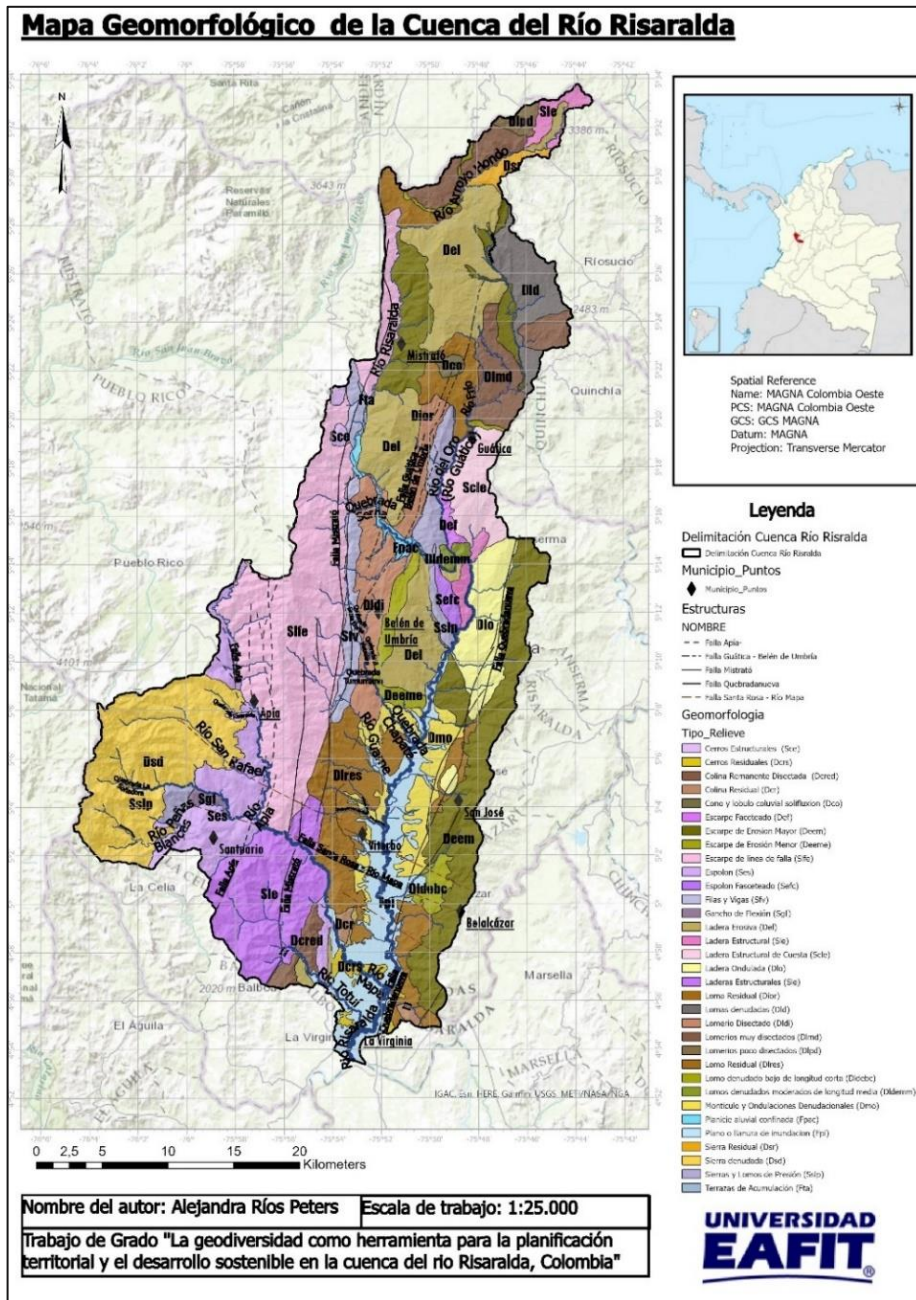


Figura 4. Mapa geomorfológico 1:25.000 resultado de revisión bibliográfica, teledetección y salidas de campo, autoría propia.

Adicionalmente en la GDB anteriormente mencionada se encuentran las capas con la siguiente información que se puede evidenciar en los anexos con los mapas mencionados a continuación:

- Pedológico (ver anexo 3).

- Paleontológico (ver anexo 4)
- Títulos mineros (ver anexo 5)
- Hidrológico (ver anexo 6)
- Lineamientos y estructuras totales (ver anexo 7)
- Climático (ver anexo 8).

6.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

6.2.1 Inventario de Lugares de Interés Geológico (LIG)

Se genera una base de datos en Excel con 314 lugares de interés geológico (ver anexo 34) caracterizados por su aporte como servicios geosistémicos en la cuenca del Río Risaralda. Adicionalmente este inventario permite aproximar el medio abiótico como generador de los servicios geosistémicos al utilizar la clasificación de Gray (2019). Por último, se obtiene una representación gráfica a través del mapa de LIG (ver anexo 13) que brinda una aproximación espacial a la complejidad sistémica de la cuenca.

6.2.2 Estimación de la Geodiversidad por Método Estadístico

El resultado que arroja el código Python diseñado por Valentin (2021) para el cálculo del índice de geodiversidad (mediante la sumatoria de los elementos abióticos para cada celda de área 600 m²) es un mapa de geodiversidad en formato vector, donde se obtienen, para la cuenca del Río Risaralda, hasta 19 caracteres abióticos por celda (ver anexo 19). Esta sumatoria presenta un peso igual para cada variable, debido a que todas se consideran de igual importancia en el cálculo de la geodiversidad (Valentín, 2021). Finalmente, dicho proceso arroja una superficie rasterizada en metodología Kriging (ver **figura 5**) que permite observar, en formato

continuo y a través de una clasificación automática de 5 clases, las zonas de muy baja, baja, media, media alta y alta geodiversidad.

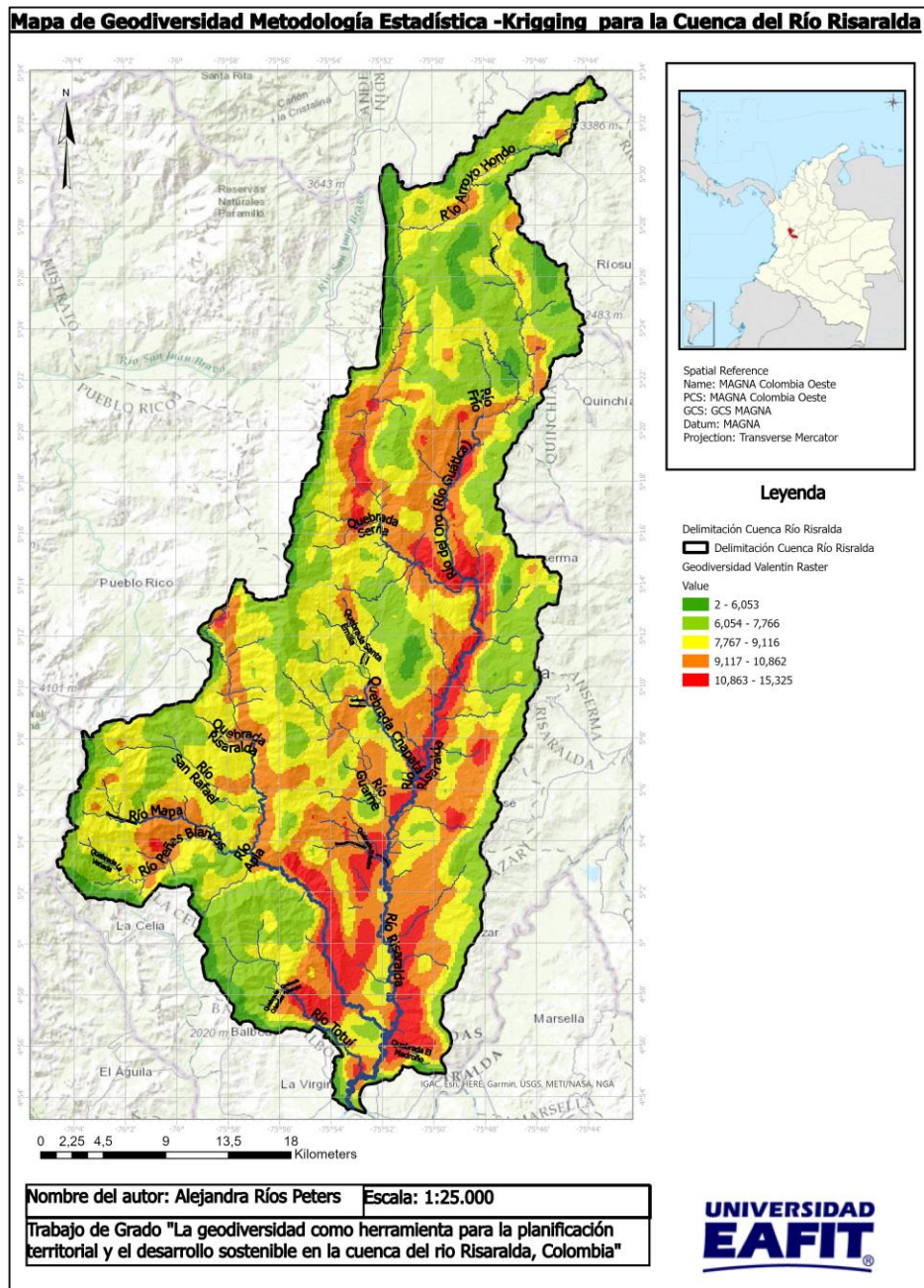


Figura 5. Mapa de geodiversidad obtenido para la cuenca del Río Risaralda en superficie ráster con metodología Krigging, autoría propia en ArcGIS Pro-3.1.

Para mejorar la visualización del resultado se utiliza el formato ráster que se presenta en la **figura 5** con metodología Kriging que permite mayor entendimiento para el usuario final.

6.2.3 Subíndices

La herramienta de (Valentín, 2021) arroja para cada variable cartográfica ingresada un subíndice de diversidad que hace un recuento por celda de cada carácter abiótico tomado en consideración, siendo estos:

- a. Subíndice Geológico (ver anexo 20).
- b. Subíndice Geomorfológico (ver anexo 21).
- c. Subíndice Estructural. (ver anexo 22).
- d. Subíndice Hidrológico. (ver anexo 23).
- e. Subíndice Climático. (ver anexo 24).
- f. Subíndice Pedológico. (ver anexo 25).
- g. Subíndice Ocurrencias minerales/títulos mineros (ver anexo 26).
- h. Subíndice Paleontológico (ver anexo 27).

6.2.4. Estimación de índices morfométricos

La aproximación por índices morfométricos que se propuso vincular a este trabajo, como una modificación de Ramírez (2022) a la metodología de Argyriou et al. (2016), permitió una parametrización más amplia del medio abiótico a la contemplada dentro del algoritmo de Valentín (2021), así se procedió a obtener los siguientes datos de la cuenca para entender la evolución paisajística y morfotectónica del área de estudio:

- a. *Índice Gradiente de Pendientes (Sg)* (ver anexo 28).

- b. Índice Relieve Relativo (R_r) (ver anexo 29).
- c. Índice de Disección (D_i) (ver anexo 30).
- d. Índice de Frecuencia de drenaje (F_u) (ver anexo 31).
- e. Índice de Humedad Topográfica (ver anexo 32).
- f. Índice de Densidad de Drenaje (D_d) (ver anexo 33).

El resultado de estos índices se parametriza en un mapa según lo descrito en la **figura 2** que permite obtener un mapa de índices morfométricos como el observado en la **figura 6**.

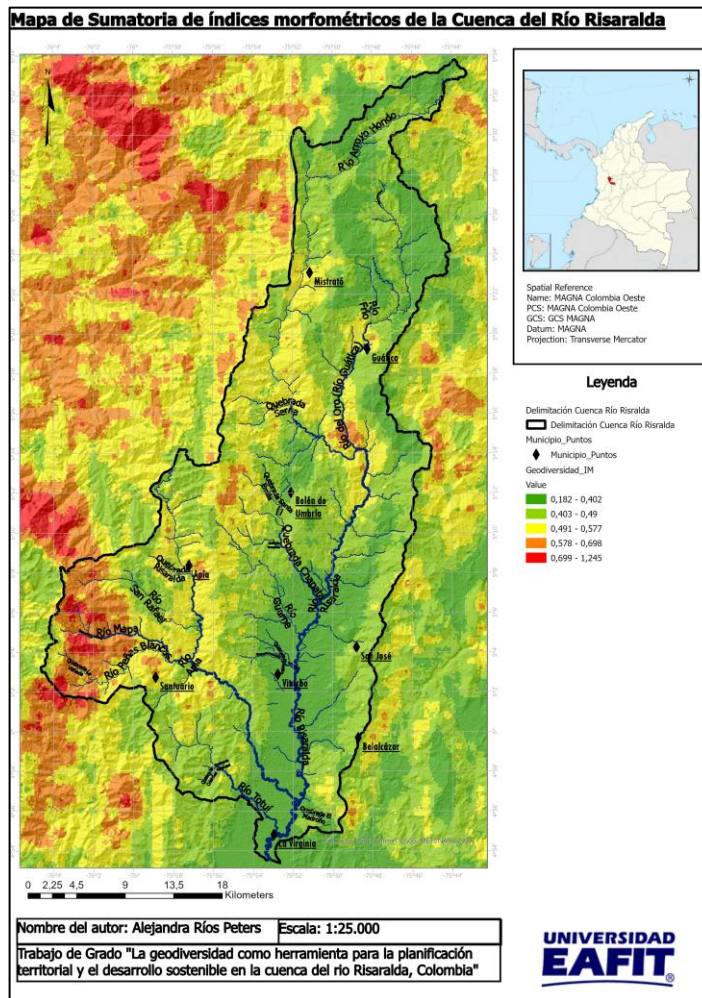


Figura 6. Mapa de índices morfométricos-ráster de la cuenca del Río Risaralda autoría propia en ArcGIS Pro 3.1.

6.2.5 Estimación final de índice de geodiversidad total

Al obtener el índice de geodiversidad en elementos abióticos (EA) por unidad de área (celda) de la zona de estudio, calculado con la herramienta estadística, se obtiene como resultado el mapa de geodiversidad por lo que entendiendo el aporte que este método brinda, al igual que la información que brindan los índices morfométricos, se procede a generar una suma con unidades normalizadas del mapa estadístico con el mapa de los índices morfométricos, generando entonces una modificación a esta metodología cuantitativa con un componente heurístico que genera un proceso semicuantitativo obteniendo como resultado un *mapa de geodiversidad total* altamente fidedigno a la realidad y diversidad del territorio.

A este resultado se le superpone el mapa de LIG para generar una corroboración de la metodología semicuantitativa (ver **figura 7**), obteniendo la siguiente información, LIG ubicados en:

- Zonas de alta Geodiversidad: 43,3% (valores entre 1,119-1,404).
- Zonas de media alta Geodiversidad 31,6% (valores entre 0,986-1,118).
- Zonas de media Geodiversidad 9,23% (valores entre 0,869-0,985).
- Zonas de media baja Geodiversidad 12,5% (valores entre 0,736-0,868)
- Zonas de baja Geodiversidad 3,37% (valores entre 0,377-0,735).

Confirmando entonces que el método es acertado y permite resaltar la importancia del medio abiótico para la sociedad, teniendo que los LIG en un 84,13% concuerdan con valores de geodiversidad que van de medio a alto y se encuentran en los “hotspot” de la amplia diversidad de la cuenca.

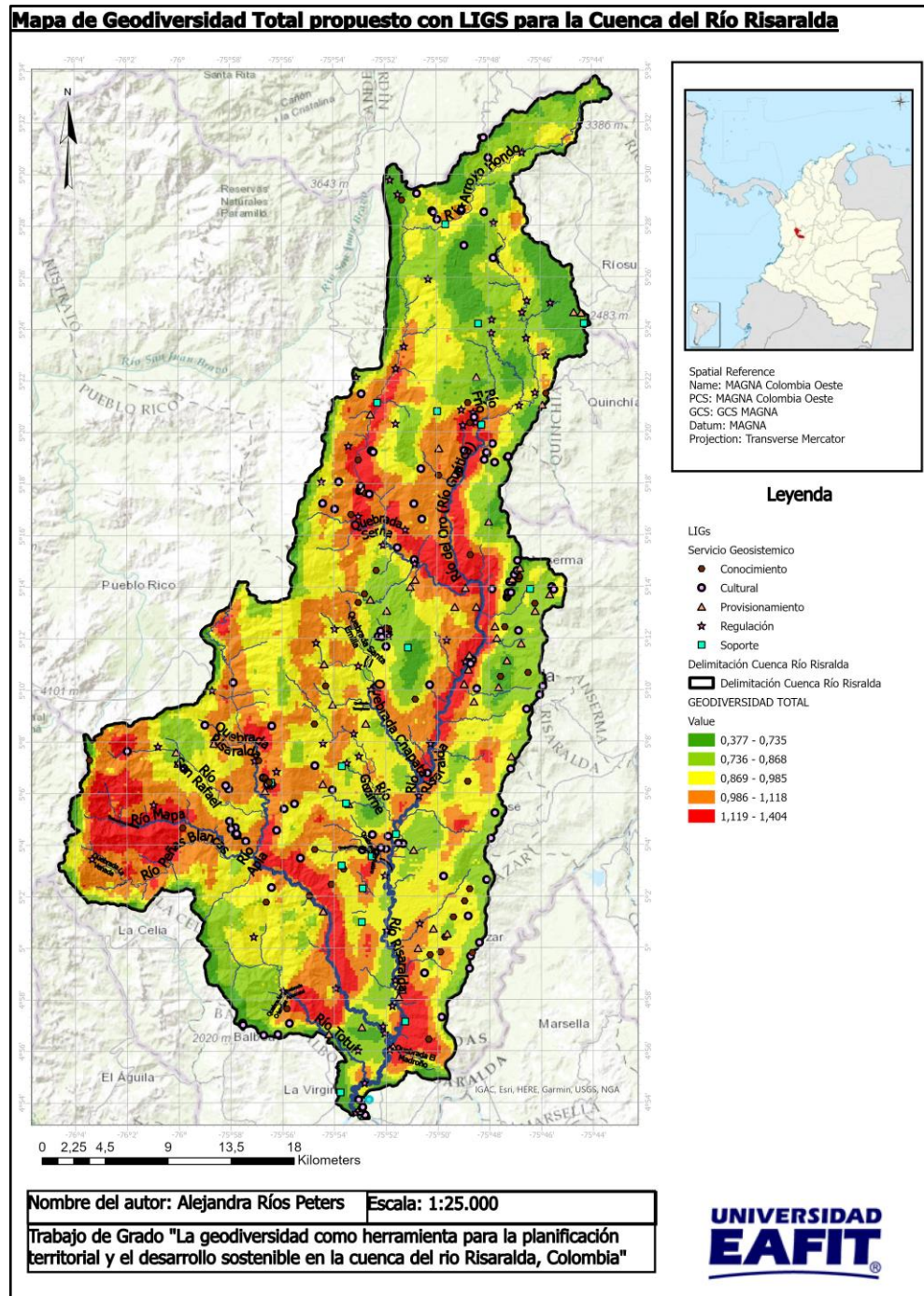


Figura 7. Mapa propuesto de geodiversidad total, resultado de sumatoria de índice de geodiversidad estadístico y sumatoria de índices morfométricos, autoría propia desarrollada en ArcGISPro 3.1.

7. DISCUSIÓN

Avanzar en el conocimiento y la estimación de la geodiversidad implica desarrollar herramientas espaciales y cartográficas que puedan apoyar, de manera visual y cuantitativa, el análisis de la complejidad del medio abiótico y la base que el mismo le brinda a la biodiversidad. Generar aproximaciones y variaciones metodológicas que permitan caracterizarlo de una manera integral permite que este campo, tan reciente para las ciencias de la tierra, pueda desarrollar modelos más confiables y con un amplio fundamento teórico-práctico que terminen siendo utilizados en pro de la planeación del territorio, el desarrollo sostenible de la sociedad y la protección de los recursos naturales.

Este trabajo evidencia igualmente la necesidad de contar con insumos cartográficos fidedignos y congruentes con la realidad de las zonas de estudio. Al obtener una mejor clasificación en este caso geológica y geomorfológica, estamos no solo avanzando en el entendimiento de la complejidad de los procesos geológicos evolutivos, si no de las relaciones y unidades que componen la cuenca en estudio. Igualmente se está obteniendo representaciones fidedignas de la riqueza del medio abiótico en un espacio determinado.

La herramienta de recuento del medio abiótico para la cuenca del Río Risaralda permite comprender la amplia diversidad que en ella sucede proponiendo en total: 22 unidades litológicas, 33 subunidades geomorfológicas, 10 clases de zonificación climática, drenajes que van desde el orden 1 hasta el 7 según Strahler, 35 diferentes tipos de suelos, 19 licencias de minería en su mayoría de carácter fluvial y 4351 estructuras y lineamientos. Estos elementos, en suma, configuran la complejidad y geodiversidad de la zona de estudio.

Desde el entendimiento geocientífico se requiere avanzar en la creación y/o exploración de herramientas de parametrización (Ej. por unidad de área) de los elementos abióticos, que faciliten la cuantificación de la geodiversidad y por medio

de índices, como se propone en este trabajo, generando un enfoque innovador dentro del campo de la Geodiversidad, pues permite brindar elementos espaciales y cartográficos para el análisis y discusión de un componente ampliamente rezagado en la planeación territorial. El generar propuestas metodológicas que se adecuen a diferentes contextos geográficos permite la valoración y comparación de la geodiversidad, y por ende permite priorizar y direccionar esfuerzos y recursos para la protección y el ordenamiento de paisajes diversos y, en algunos casos, únicos.

Igualmente, avanzar en la representación y visualización de temas complejos como este brinda beneficios a la sociedad, pues dichas herramientas facilitan el entendimiento y convocan la discusión entre profesionales vinculados a las ciencias de la tierra o medioambiente, autoridades, tomadores de decisiones y las comunidades que se encuentran inmersas y habitan las zonas de estudio. Al utilizar una parte estadística en la cuantificación se consigue, por un lado, disminuir la subjetividad propia de métodos cualitativos o heurísticos (basados en apreciaciones de expertos) y por otro lado mejorar la objetividad y trazabilidad de la asignación de pesos y valores, pues se estima cuantitativamente el aporte de cada carácter abiótico a esa conjugación llamada geodiversidad.

Los tres entes configuradores de la multiplicidad de georriqueza que se puede encontrar en la zona de estudio, y que van a direccionar muchos de los procesos que en esta se dan, son la:

1. *Diversidad geológica*: que deriva de la complejidad petrográfica y variedad litológica.
2. *Diversidad Climática*: configurada por su ubicación del Chocó biogeográfico en el occidente y al oriente con divisoria andina entre *Cauca- Risaralda*.
3. *Diversidad Estructural*: asociada a una dominancia tectónica que establece las dinámicas evolutivas de la cuenca.

Sin demeritar la participación de los demás caracteres, los subíndices nos muestran que el orden de importancia por cantidad de aparición en la celda para el resto sería el siguiente:

4. Diversidad geomorfológica.
5. Diversidad hidrográfica.
6. Diversidad pedológica.
7. Diversidad paleontológica.
8. Diversidad de ocurrencias minerales.

Teniendo en cuenta que el procesamiento con la herramienta de Valentín (2021) para la obtención del índice de geodiversidad se realiza de forma automática, la suma de cada uno de los índices mencionados anteriormente en las divisiones de la celda de 600 m² dará como resultado un mapa que permite establecer la geodiversidad de la zona de estudio de manera estadística. Usando esta metodología se le asigna el mismo peso a cada una de las variables, evitando un sesgo de sobreestimación o subestimación de alguno de los valores usados, y generando una valoración cuantitativa de la geodiversidad del área de estudio (Pereira et al., 2013 citado en Valentín, 2021) dando como resultado la **figura 5**.

Se encontró que la cuenca del Río Risaralda una gran cantidad de zonas de geodiversidad con categorías que van de **Media a Alta**. Dicho resultado coincide con los numerosos LIG identificados y clasificados (314), constituyendo una primera aproximación a la realidad de la zona y por ende es recomendable seguir avanzando en generar representaciones cada vez más fidedignas del medio abiótico en dicha cuenca.

Al verificar la propuesta de Argyriou et al. (2016) se vuelve entonces un reto lograr integrar su metodología con la de Valentín (2021), por lo que recurriendo a herramientas como paneles de expertos se decide adoptar la aproximación de Ramírez (2022) establecida en su trabajo de maestría para comprender como la

evolución de paisaje puede ser un elemento caracterizador de la geodiversidad, y puede ser tenido en cuenta para su parametrización. Por esto se hizo necesario extraer cada índice en un SIG, así:

- a. *Índice Gradiente de Pendientes (Sg).*
- b. *Índice Relieve Relativo (Rr).*
- c. *Índice de Disección (Dd).*
- d. *Índice de Frecuencia de drenaje (Fu).*
- e. *Índice de Humedad Topográfica (TWI).*
- f. *Índice de Densidad de Drenaje (Fu).*

Para que con estos resultados se pudiera generar una esquematización en un producto final como un mapa de índices morfométricos (ver **figura 6**), que permite evidenciar que las zonas resaltadas no se han tenido en cuenta en el método estadístico con la metodología de Valentín (2021) índice de geodiversidad. La propuesta de generar entonces una sumatoria de los mapas de **geodiversidad** y de **índices morfométricos** proporciona un nuevo enfoque y una representación cartográfica más amplia que busca, finalmente, un modelo que se acople mejor a la realidad del territorio.

Adicionalmente, la metodología estadística ampliamente aceptada en la academia latinoamericana para cuantificar la geodiversidad es un punto de partida para los interesados en el tema. Sin embargo, se hace recomendable generar modificaciones y aproximaciones que tengan en cuenta una descripción objetiva de los parámetros que conforman el paisaje como lo son los índices morfométricos y que puedan adicionarse a metodologías preestablecidas sin generar sobre cuantificación de ciertos elementos como pasaría si se suman metodologías como Valentín (2021) y Argyriou et al. (2016) sin tener en cuenta este precepto.

Este trabajo propone sumar un parámetro que no ha sido cuantificado dentro de la metodología de Valentín (2021) y que no genera una sobreestimación, como lo es el resultado de la suma de los índices morfométricos de la cuenca (ver **figura 6**). Lo anterior mezclado con el mapa de índice de geodiversidad estadística (**figura 5**) permite un resultado de *índice de geodiversidad total* (**figura 7**), mucho más integral que termina representando de manera fidedigna lo observado en campo, como también la información obtenida en las recopilaciones bibliográficas.

7.1 GEODIVERSIDAD ORIENTADA HACIA LOS SERVICIOS GEOSISTÉMICOS

Dada la importante oferta que la cuenca del Río Risaralda le ofrece al medio y a las comunidades que la habitan, es recomendable avanzar en la exploración y uso de herramientas como las categorizaciones de servicios geosistémicos brindadas por expertos como Gray (2019). En las cuales se logra explicar la importancia del capital natural y como dichos servicios son generados desde el medio abiótico, el cual, junto con el medio biótico, termina siendo la columna vertebral del desarrollo de las sociedades. El establecer lugares de interés geológico (LIG) que se puedan entender también como servicios geosistémicos, permite entonces vincular el conocimiento académico a la gestión por la protección de un activo ambiental y pone sobre la mesa la necesidad de repensar el medio abiótico y la forma de relacionarse con él, teniendo como norte el ordenamiento y la sostenibilidad de sus recursos.

Lograr comprender que de los servicios geosistémicos identificados en este trabajo en un 43,07% se relacionan con servicios de provisionamiento, regulación y soporte (como se evidencia en la **figura 8**) nos hace entender la necesidad de avanzar en el ordenamiento del territorio y de gestionar planes de desarrollo que no solo busquen el aprovechamiento de los bienes naturales sino que también protejan un

recurso poco comprendido, y mucho menos tenido en cuenta, por parte de los tomadores de decisiones en materia de política nacional, regional y local.

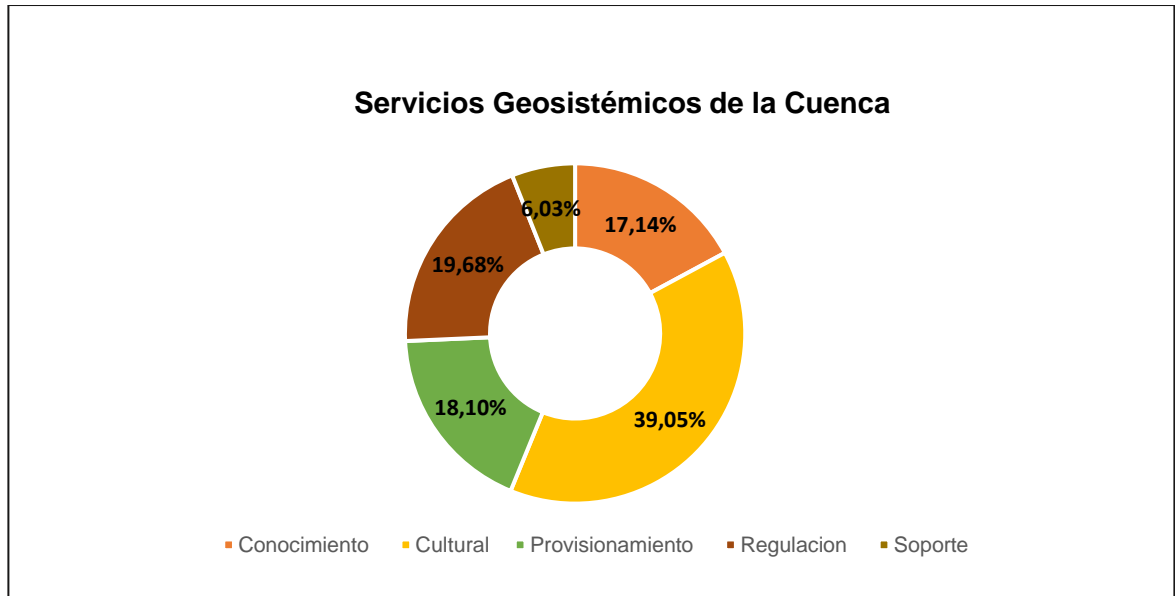


Figura 8. Gráfico de servicios geosistémicos, dividido en porcentajes para la cuenca del Río Risaralda, autoría propia en Excel con base a la categorización de LIG.

Estimar la geodiversidad y determinar los lugares de interés geológico no solo es un parámetro cuantitativo si no que busca generar interconexiones que puedan aproximar la ciencia a la sociedad, y que los habitantes de un territorio puedan acceder a herramientas que mejoren la comprensión de su entorno y de los beneficios que en el existen, tanto en el medio biótico como abiótico, en este caso específico las personas que habitan la cuenca del río Risaralda. Esto permite entonces protegerlo, conservarlo y gestionarlo como un recurso limitado que requiere de sus habitantes para ser preservado y usufructuado a largo plazo.

7.2 RELACIÓN GEODIVERSIDAD, BIODIVERSIDAD Y MODELOS DE DESARROLLO TERRITORIAL.

Lograr generar sinergias a nivel interdisciplinario en la academia, que aporten al desarrollo sostenible y al avance del conocimiento de la sociedad que habitan debe terminar siendo el objetivo del trabajo de los científicos vinculados al medioambiente. Trascender la producción de datos e información que los geocientíficos pueden obtener mediante procesos rigurosos de ciencia en diferentes áreas como: la petrografía, recursos minerales, hidrología, edafología y demás para convertirlo en fuente de información accesible que permita entender el provisionamiento de la sociedad logra articular la ciencia con la sociedad y la planeación del territorio. Los cuales, no solo son un área de estudio sino un territorio con procesos donde confluyen múltiples actores, intereses y saberes sociales, políticos, económicos y culturales dentro de una sociedad en continuo cambio y expansión. Es entonces donde este trabajo concluye que la geodiversidad es “un concepto útil para la gestión y conservación del patrimonio abiótico, cuya incorporación es necesaria en políticas locales de desarrollo sostenible y de valoración de recursos naturales” (Serrano y Ruiz, 2007 citado en Fernández et al., 2015).

Tanto la comunidad científica como las autoridades vinculadas al ordenamiento y la planeación territorial deben avanzar en el entendimiento de las limitaciones y complejidades, pero también de las oportunidades y retos que conllevan el administrar un recurso no renovable, como lo termina siendo la geodiversidad. Este tipo de proyectos buscan brindar conocimiento que permita generar estrategias de sostenibilidad para el sustento de las sociedades que habitan los territorios. Comprender que no solo la biodiversidad si no la geodiversidad requiere ordenamiento, planeación y protección especial termina siendo la finalidad de estos procesos de estimación académica. Al igual que, generar información que facilita el entendimiento y transforma el conocimiento para comprender la importancia de

ambos medios para la sociedad, y por ende la necesidad de una planificación integral de los recursos del planeta.

La zona de estudio tiene como ventaja modelos de ordenación territorial que han tenido miradas complementarias que pueden generar sinergias con la Geodiversidad, es el caso del Bosque Modelo Risaralda (BMR) compuesto por tres subregiones, la subregión I *Cuenca del río Otún* que alberga las grandes ciudades p.e. Pereira, Dosquebradas, Santa Rosa de Cabal. La subregión II *Cuenca del río Risaralda*, la cual contiene la zona predominantemente agrícola, en especial de cultivos de café y en menor grado de cacao, piña, caña de azúcar y frutales. La subregión III alberga las grandes *reservas de bosques tropicales lluviosos*. La geomorfología del paisaje es modelada por el vulcanismo (complejo volcánico Ruiz-Tolima), la deglaciación, la dinámica fluvio-torrencial (cuencas del río Otún y Risaralda) y la actividad tectónica (fallas Cauca-Romeral), que permiten características únicas para el desarrollo de un paisaje exclusivo de la región y procesos de productividad asociadas a la mirada que desde este proyecto investigativo en Geodiversidad se plantea para la zona.

Es por esto que aprovechar reconocimientos como ser una zona dentro del Paisaje Cultural Cafetero (PCC) - UNESCO, como el tener zonas protegidas y otras en Parques Nacionales Naturales (PNN) como el Tatamá permite demostrar las condiciones geodiversas especiales de la región. Que son únicas en el mundo y deben ser objeto de estudio, comprensión y protección.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Este trabajo de grado permite exponer la geodiversidad como un insumo para la gestión territorial, en específico de la cuenca del Río Risaralda, e invita a generar

otros procesos de cuantificación que permitan desmitificar la geodiversidad y sus aplicaciones en diferentes ámbitos.

- Es importante resaltar que la metodología desarrollada en este proyecto termina siendo una confluencia de ideas de múltiples expertos en temas de geodiversidad, paisajismo, planeación territorial, sistemas de información geográfica y estudiantes que buscan integrar el medio abiótico de un territorio para su gestión sostenible. Al ser parte de un proceso investigativo se recomienda seguir generando discusiones y aproximaciones metodológicas cuantitativas y semicuantitativas que permitan seguir afinando el proceso de parametrización de la geodiversidad.

-Es necesario también implementar procesos de investigación en materia de estrategias, mecanismos y planes de acción que permitan de una manera sostenible y participativa aprovechar el potencial Bio-Geodiverso del país a través de la bioeconomía para comunidades de alto impacto como las rurales y étnicas que caracterizan la región.

- De igual manera, se invita a explorar las posibilidades de los productos cartográficos como materiales para el diálogo y el análisis entorno al territorio, involucrando a comunidades afrodescendientes, rurales e indígenas lo cual permitiría no solo generar un recurso científico-educativo, si no elementos para el análisis de modelos socioeconómicos basados en la protección y conservación del medio biótico y abiótico como aporte a la construcción de un país en proceso de postconflicto.

- Por último, se recomienda seguir generando procesos de aproximación de la academia a la cuenca del Río Risaralda ya que una zona con tan variados procesos de interés geológico y biológico representa un laboratorio natural y social en el cual los actores interesados podrían aportar en el entendimiento de su complejidad.

REFERENCIAS

- Agencia Nacional de Minería. (2017). *Cartografía*. Viewer <https://annamineria.anm.gov.co/Html5Viewer/index.html?viewer=SIGMExt&locale=es-CO&appAcronym=sigm>
- Argyriou, A. V., Sarris, A., & Teeuw, R. M. (2016). *Using geoinformatics and geomorphometrics to quantify the geodiversity of Crete, Greece*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.04.006>
- Cañas, J. S. (2015). *Marco bioestratigráfico y proveniencia de la Formación Penderisco, y su significado en la formación de un domo*. [Tesis de Maestría] Universidad Nacional. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/54595/Tesis%20MSc%20Juan%20Sebasti%c3%a1n%20D%c3%adaz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Carcavilla, L. D. M. , Durán J.J., & López-Martínez, J. (2008). *Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico*. *Geo-Temas*, 1299-1303. https://www.igme.es/patrimonio/descargas/concepto_geodiversidad.pdf
- Corporación Autónoma Regional del Departemetro de Risaralda-CARDER , Corpocaldas, Consorcio Ordenamiento de Cuenca Rio Risaralda; Ministerio de Hacienda, & Ministerio de Medio Ambiente (2017). *PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RIO RISARALDA FASE DIAGNÓSTICO*. POMCA, Pereira. <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/32888>
- SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO - SGC. (2014). *MEMORIA EXPLICATIVA DEL MAPA GEOMORFOLÓGICO APLICADO A MOVIMIENTOS EN MASA ESC 1:100.000 PLANCHA 185 – RIOSUCIO*. Sogamoso.

<https://recordcenter.sgc.gov.co/B7/21003010028339/Documento/Pdf/2105283391101000.pdf>

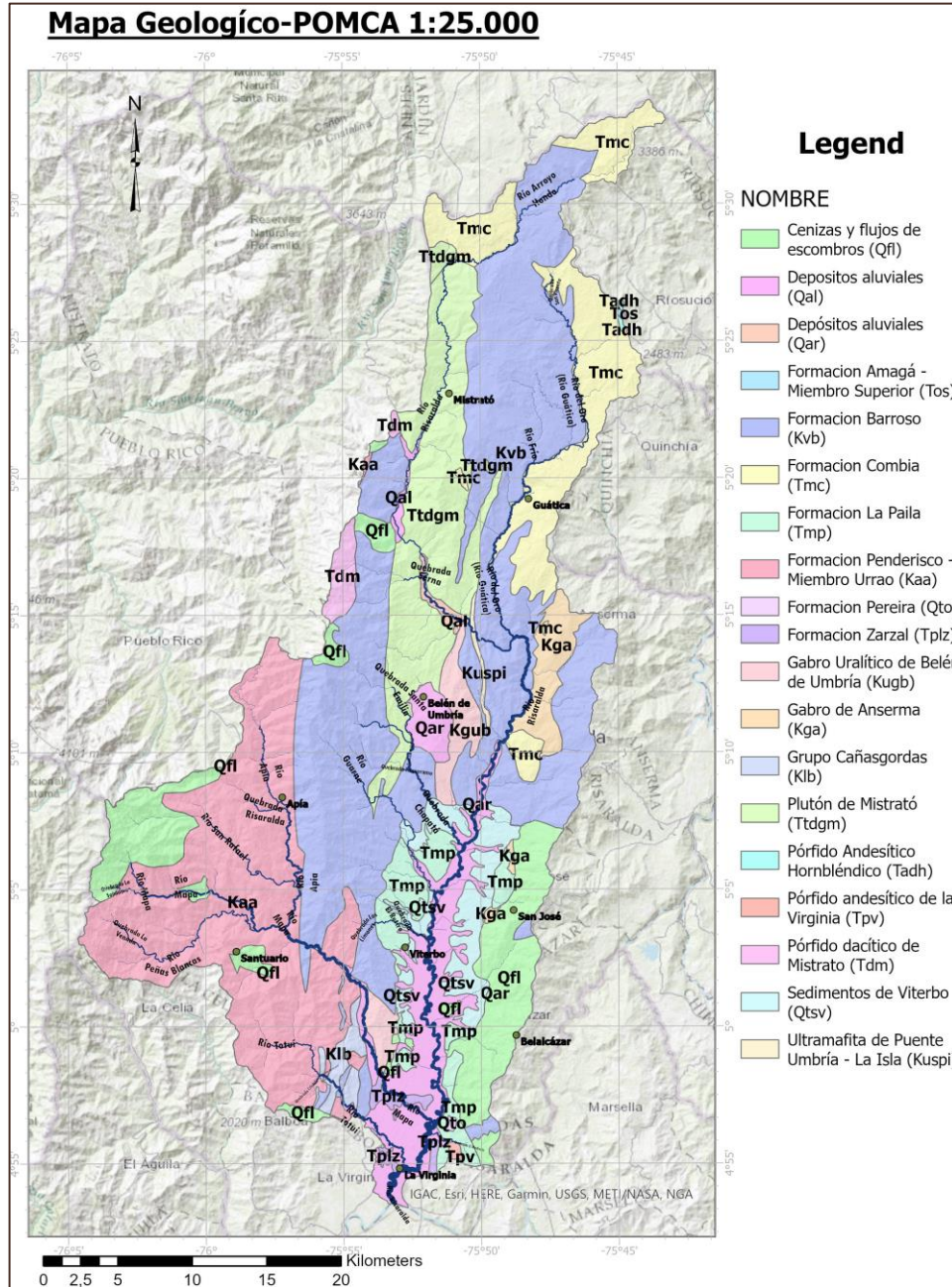
- Duque-Caro, H. (1989.). El arco de Dabeiba: nuevas aportaciones al conocimiento del noroccidente de la Cordillera Occidental. *5 Congreso Colombiano de Geología* , (págs. 108-126). Bucaramanga .
- Fernández, G., Ramos, A., Valenzuela, S., & Ricci, S. (2015). GEODIVERSIDAD, PATRIMONIO MINERO Y GEOTURISMO: PROPUESTA DE PARQUE GEOMINERO EN ARGENTINA. *Turismo y Sociedad*, XVII, 17-37. doi:<http://dx.doi.org/10.18601/01207555.n17.02>
- Frisk, E. L., Volchko, Y., Snadstrom, O. T., Soderqvist, T., Ericsson, O., Mossmark, F., & Norrman, J. (2022). *The geosystem services concept – What is it and can it support subsurface planning?* *Ecosystems Services* 58. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101493>
- Gray, M. (2004). *Geodiversity valuing and conserving abiotic nature*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(04\)80008-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(04)80008-7)
- Gray, M. (2019). *Geodiversity, geoheritage and geoconservation for society*. Chinese Roots Global Impact. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.11.001>
- Gray, M. (2018). *The confused position of the geosciences within the “natural capital” and “ecosystems services” approaches*. *Ecosystem Services* 34 , 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.10.010>
- Henao, J. L. (2015). *Fotogeología práctica*. Manizales: Editorial Universidad de Caldas .
- Hincapié, D. F. (2011). *REVISIÓN CARTOGRÁFICA Y PETROGRAFÍA DETALLADA DE LA CUARZODIORITA DE MISTRATÓ*. Manizales: Repositorio de la Universidad de Caldas.

- Hincapié, D. F., Salazar, A. F., & Toro, L. M. (2011). *PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS ROCAS INTRUSIVAS AFLORANTES ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MISTRATÓ Y BELÉN DE UMBRÍA (DEPARTAMENTO DE RISARALDA, CORDILLERA)*. Boletín de Geología, 47-57. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-02832011000200003
- IGAC. (2017). *Datos Abiertos Agrología*. Obtenido de Geoportal: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>
- Ingeominas. (2001). *Investigación Integral del Anden Pacífico Colombiano*. Bogotá: RADARSAT International Inc. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010020751/documento/pdf/2105207511101000.pdf>
- MORENO-SANCHEZ, M. , PARDO-TRUJILLO, A., & GOMEZ-CRUZ, A. D. (2002). *AMBIENTES OCEANICOS SOMEROS EN PUENTE UMBRIA (CORDILLERA OCCIDENTAL, COLOMBIA) DURANTE EL CAMPANIANO-MAASTRICHTIANO*. Geo-Eco-Trop 26/2, 75-90. https://www.researchgate.net/publication/285246032_Campanian-Maastrichtian_shallow_oceanic_environments_at_Puente_Umbria_Western_Cordillera_Colombia
- NASA. (2023). *ASF DATA Search Vertex*. Obtenido de Earth DATA: <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- PÁEZ-ACUÑA, L. A. (Abril de 2013). *ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO Y DE PROVENIENCIA DEL MIEMBRO SUPERIOR DE LA FORMACIÓN AMAGÁ EN LOS SECTORES DE LA PINTADA Y VALPARAISO (CUENCA AMAGÁ, ANDES NOROCCIDENTALES)*. [Tesis de Maestría] Medellín, Antioquia, Colombia: Repositorio Institucional Universidad EAFIT. <http://hdl.handle.net/10784/1264>

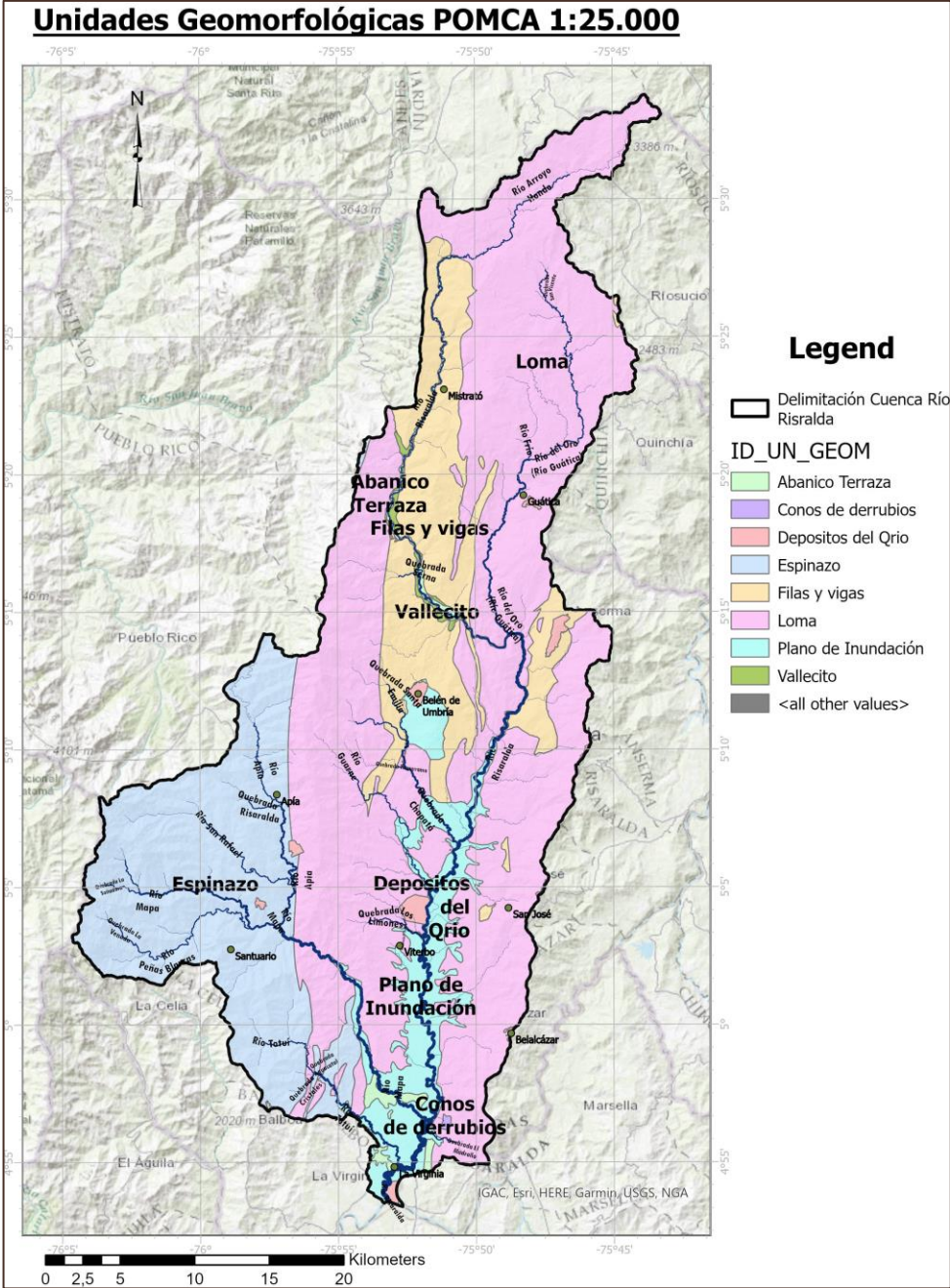
- Pereira, D. I. (2013). *Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): An innovative approach*. Environmental Management , 541–552. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>
- Ramírez, M. (2022). *Índices morfométricos*. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Salazar-Rios, A. F. (2011). *ANÁLISIS GEOQUÍMICOS DE LA CUARZODIORITA DE MISTRATÓ (Ecdm), EN EL MUNICIPIO DE MISTRATÓ (RISARALDA)*. [Tesis de Pregrado] 1-95, Editorial Universidad de Caldas. https://repositorio.ucaldas.edu.co/flip/index.jsp?pdf=/bitstream/handle/ucaldas/10838/Andr%c3%a9s_Felipe_Salazar_R%c3%ados_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Servicio Geologico Minero Argentino. (2019). *Sitios de Interés Geológico*. Obtenido de <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/1305#:~:text=En%20un%20sentido%20amplio%2C%20la,regi%C3%B3n%2C%20o%20de%20la%20Tierra>
- Valentín, D. (2021). *Desarrollo de una herramienta de ArcGis para el cálculo de la geodiversidad en Latinoamérica, y su análisis estadístico y de correlación con las amenazas en la Cuenca del Río Tua, Casanare, Colombia*. [Tesis de Maestría] Ciudad de México. <http://132.248.9.195/ptd2023/enero/0831002/Index.html>
- Vasco, G. (2020). *IMPORTANCIA SOCIAL y ECONÓMICA DE LA GEODIVERSIDAD: Estrategia de la Geodiversidad de la CAPV*, 1-17. https://bideoak2.euskadi.eus/debates/geodiversidad/estrategia_importancia.pdf

ANEXOS

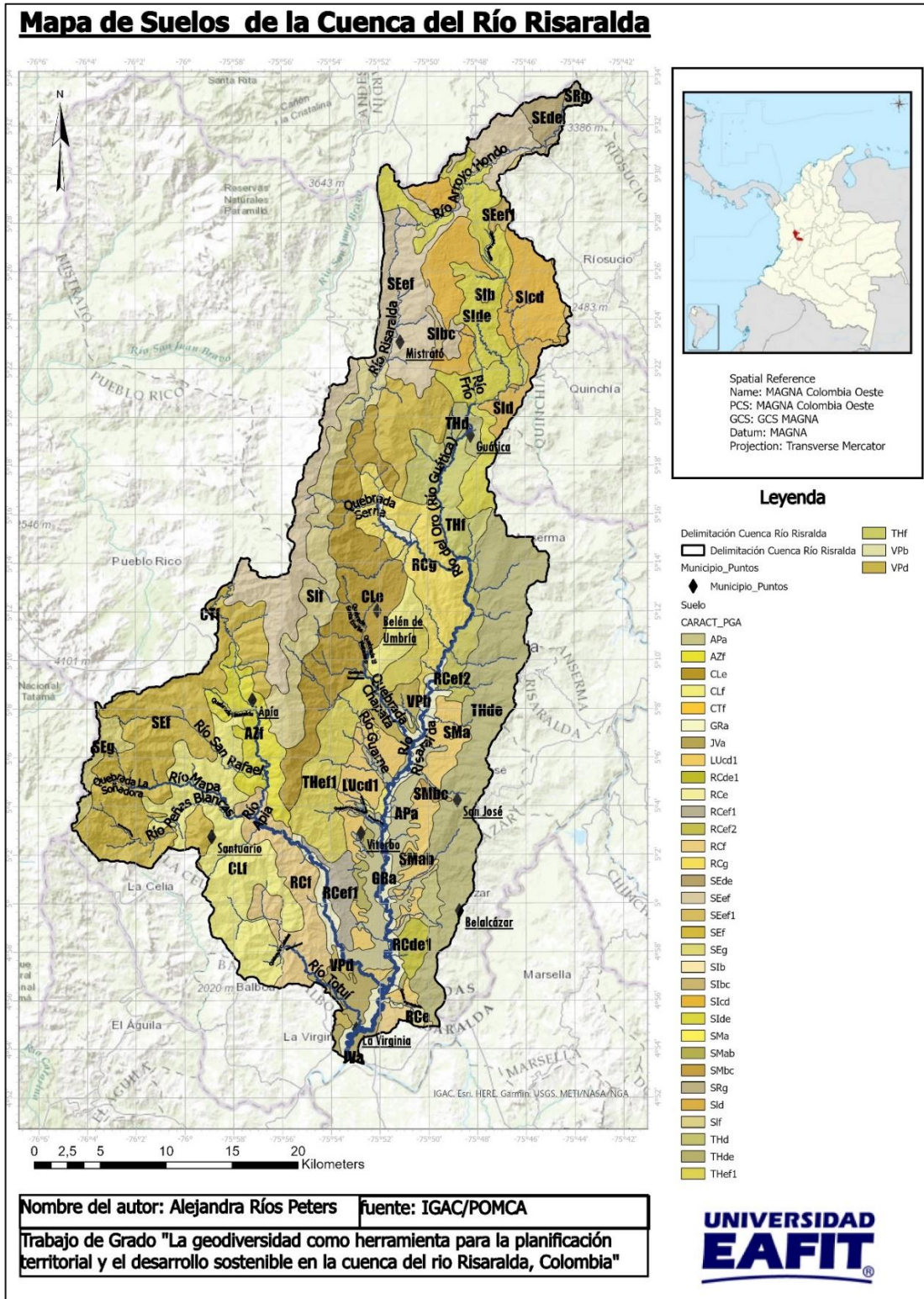
1. Mapa geológico, obtenido de la GDB del POMCA de la cuenca del río Risaralda (CARDER et al., 2017).



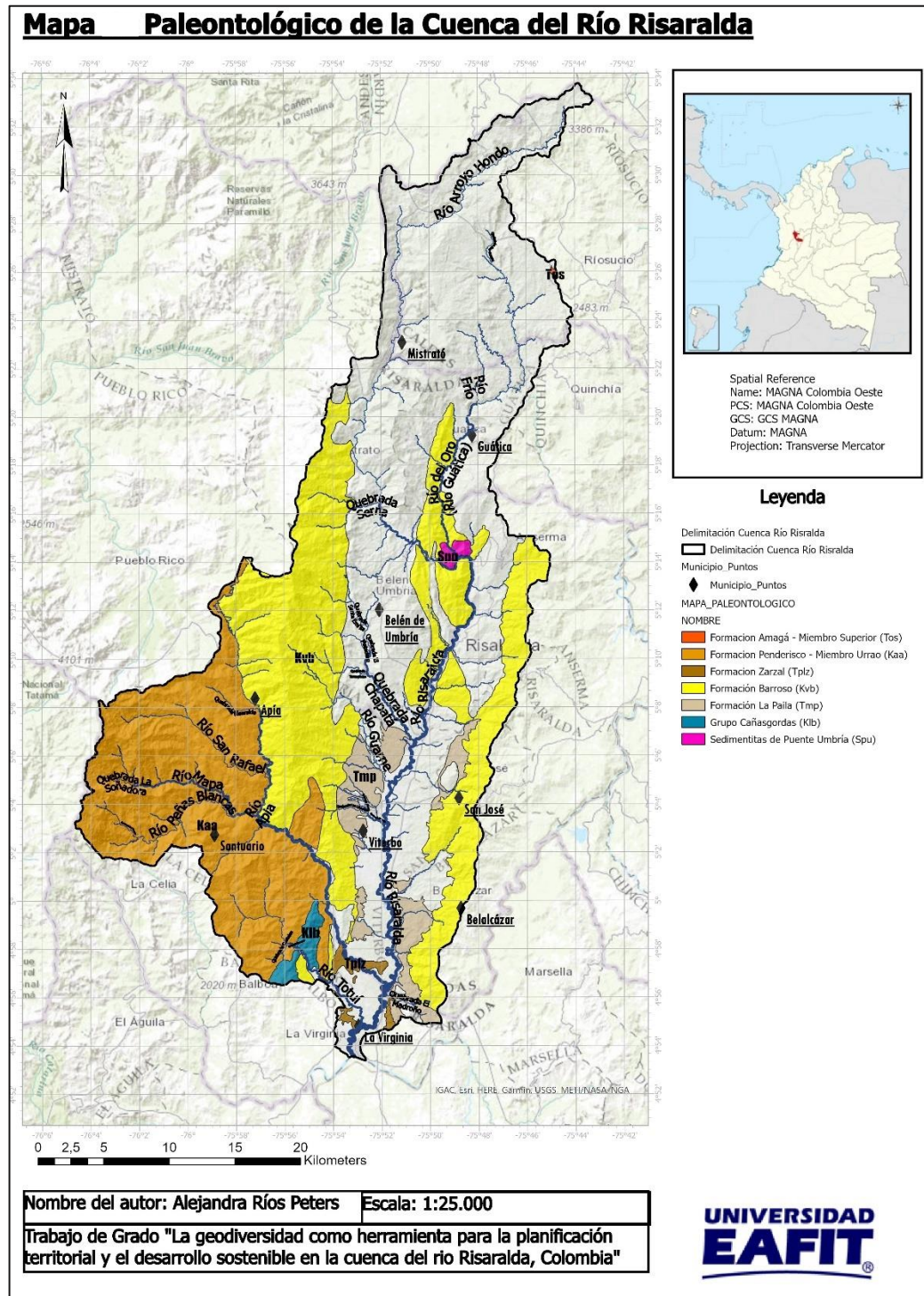
2. Mapa geomorfológico obtenido de la GDB del POMCA de la cuenca del río Risaralda (CARDER et al., 2017).



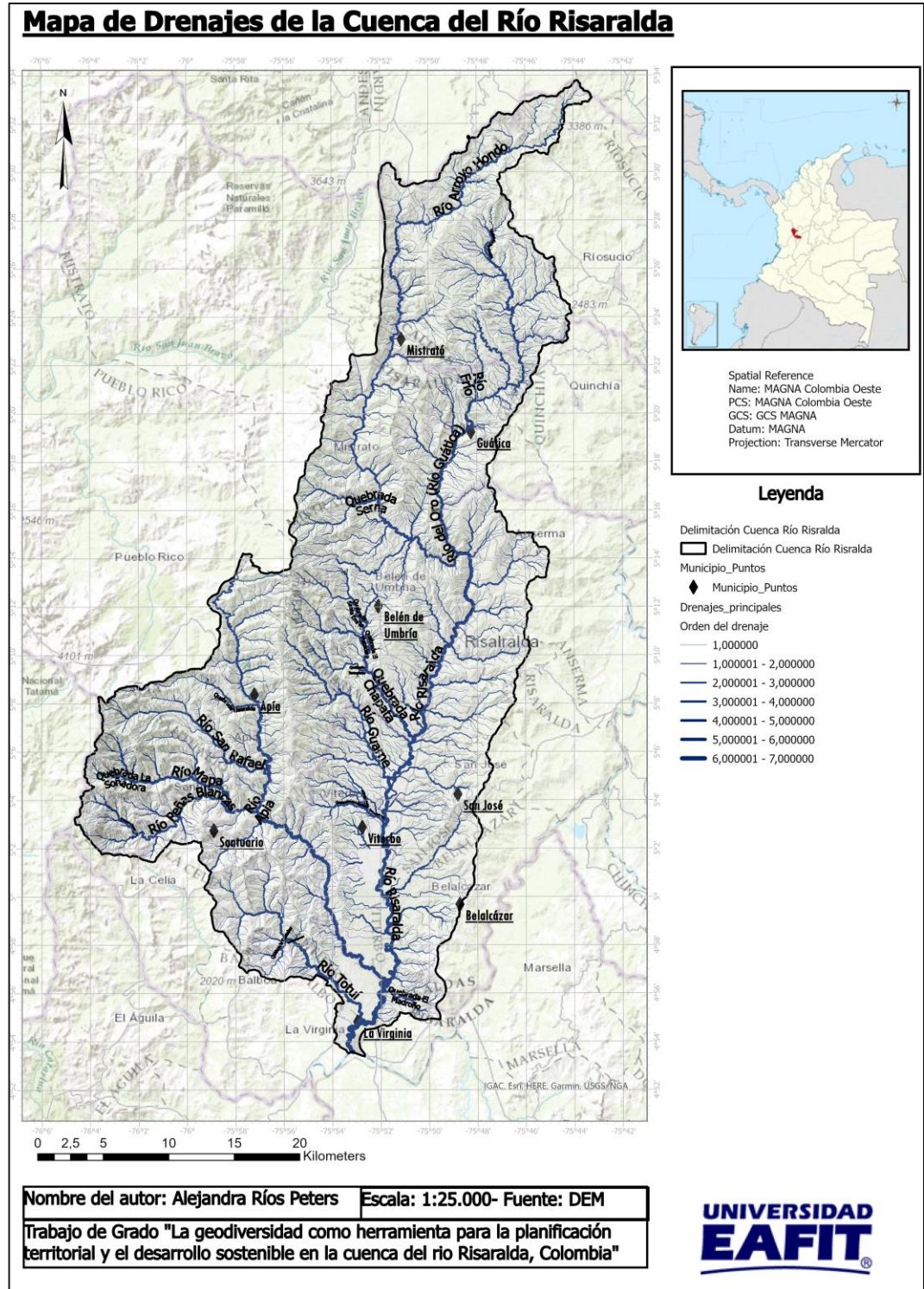
3. Mapa de suelos obtenido del (IGAC, 2017) en GDB del POMCA (CARDER et al., 2017).



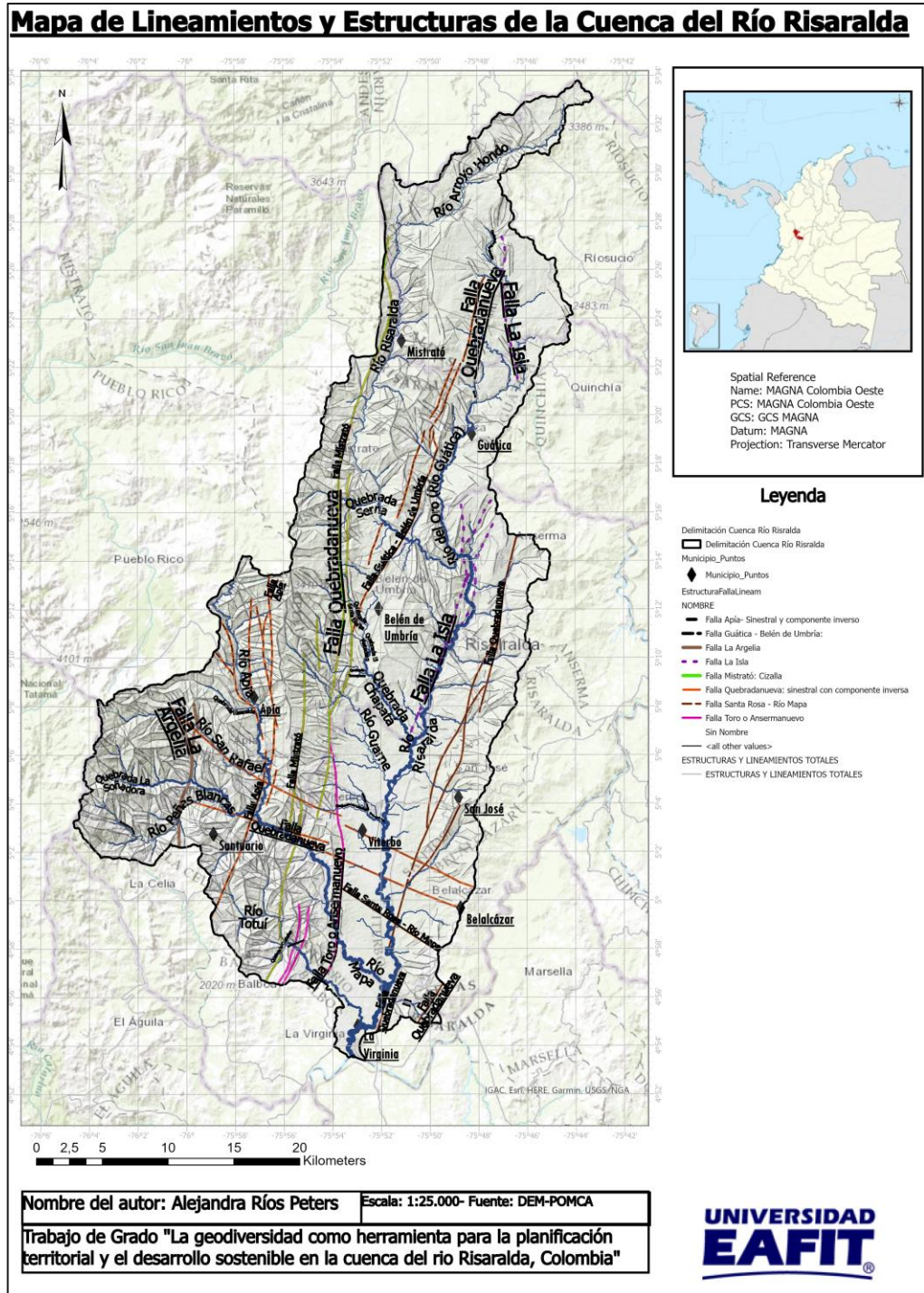
4. Mapa Paleontológico resultado de recopilación bibliográfica propia.



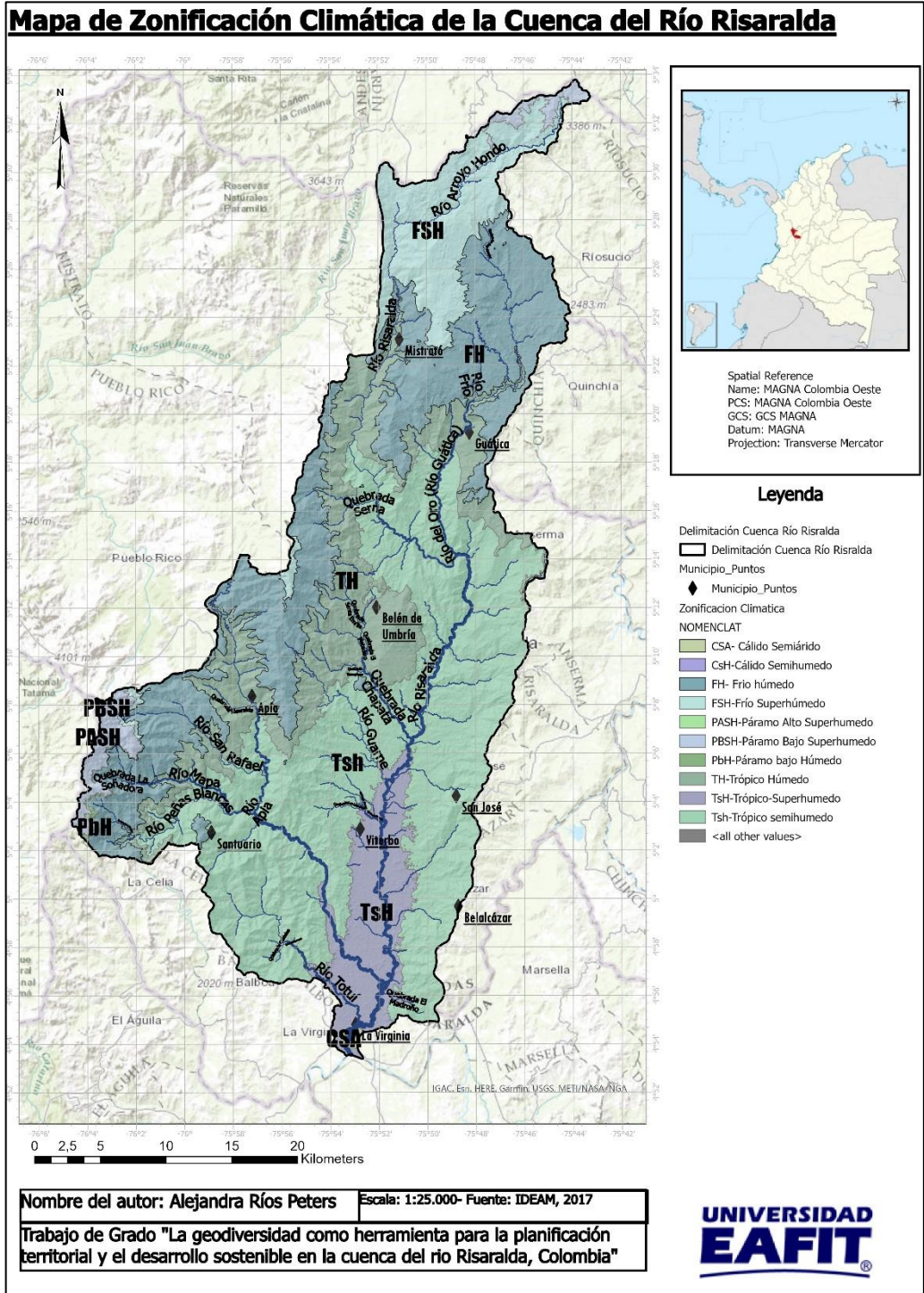
6. Mapa de drenajes obtenidos de manera automática con el DEM 12.5 del satélite Alos Palsar (NASA, 2023).



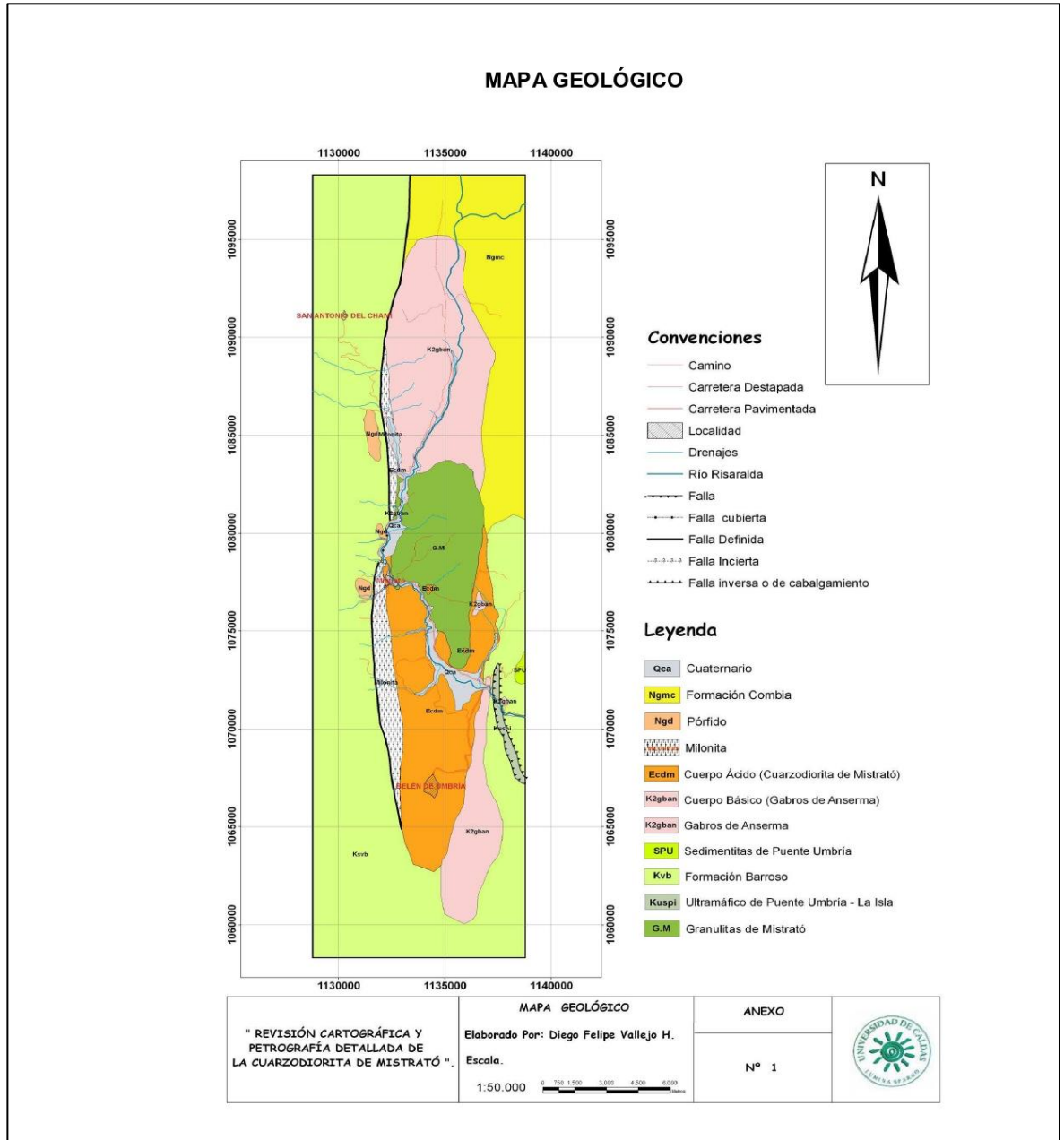
7. Mapa de lineamientos y estructuras totales obtenidos del POMCA (CARDER et al., 2017) + extracción automática propia en *Catalyst* y *QGIS* del DEM (NASA, 2023).



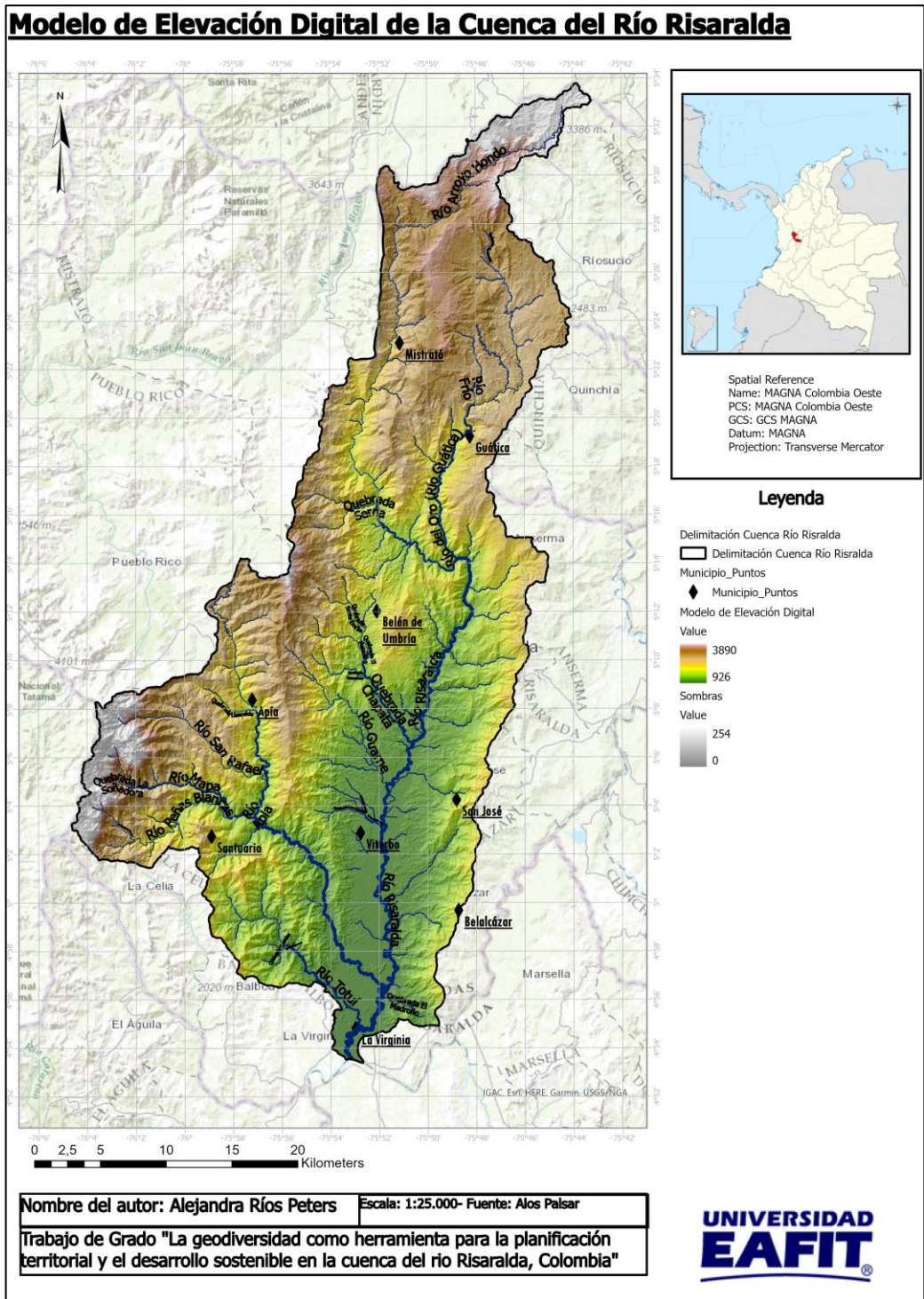
8. Mapa de zonificación climática obtenido del IDEAM (2017).



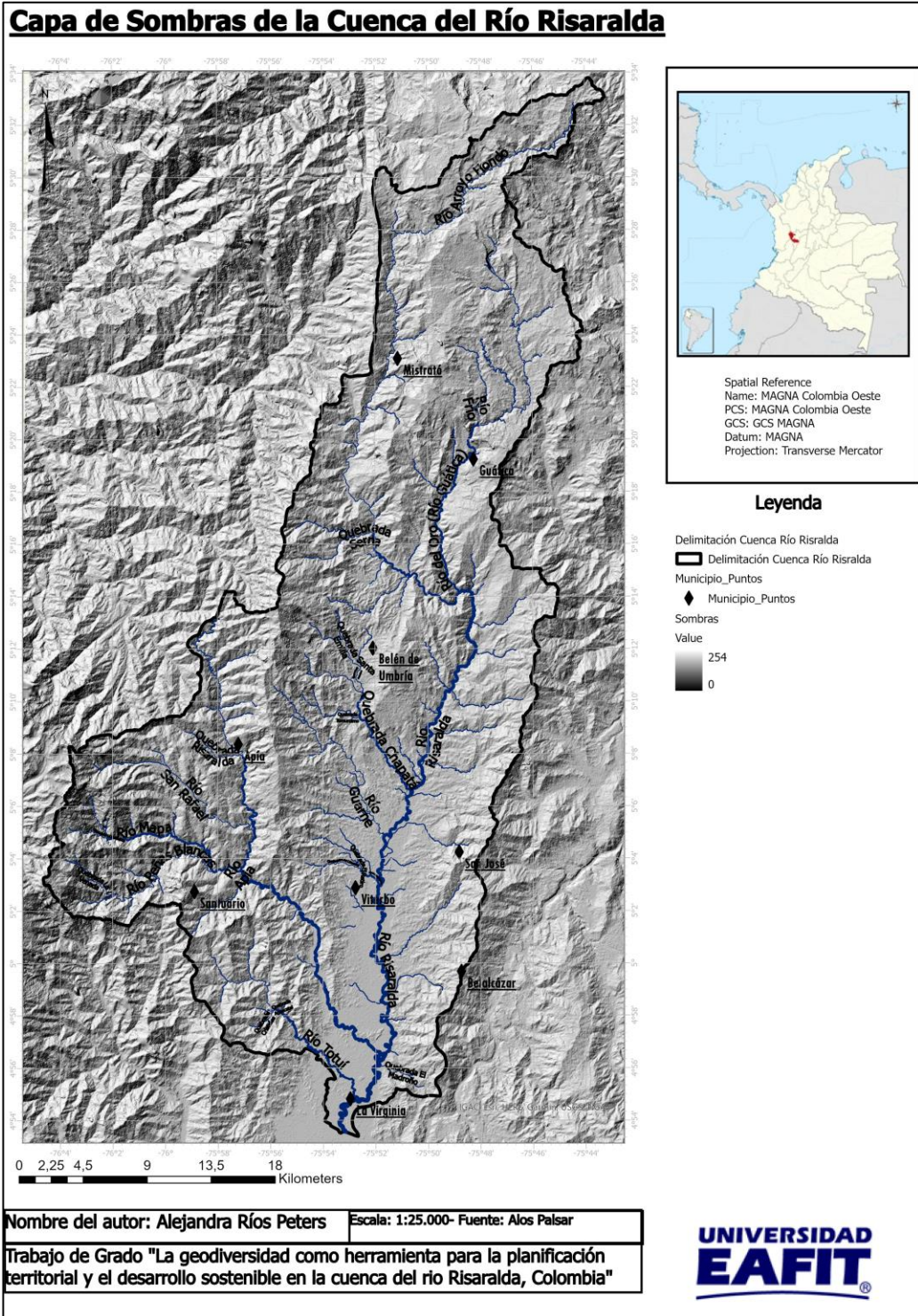
9. Revisión cartográfica modificada y propuesta por Hincapié (2002) y adaptada en la geología de este trabajo.



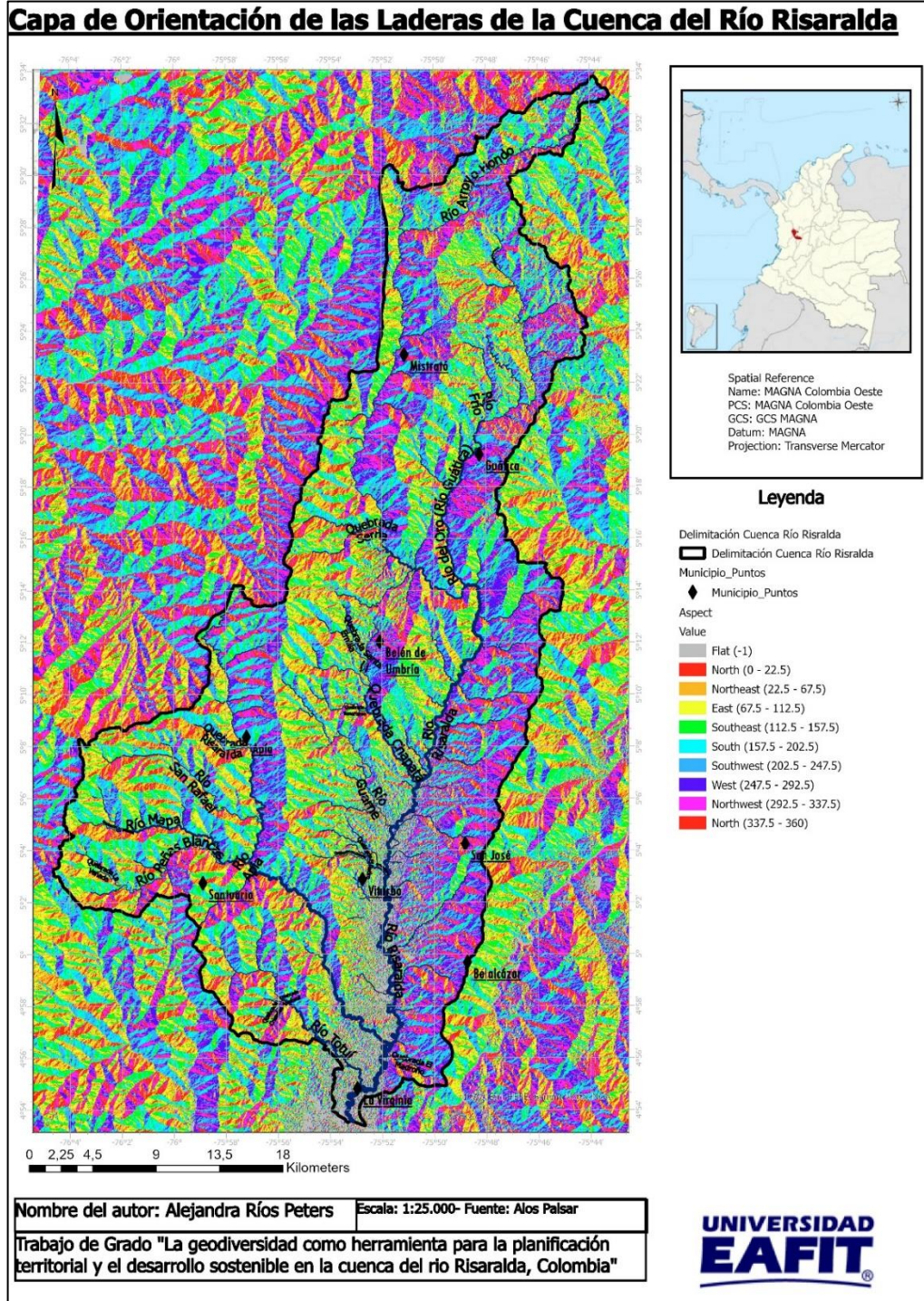
10. Modelo de Elevación Digital con resolución 12.5 y corregido hidrográficamente obtenido del satélite Alos Palsar (NASA, 2023).



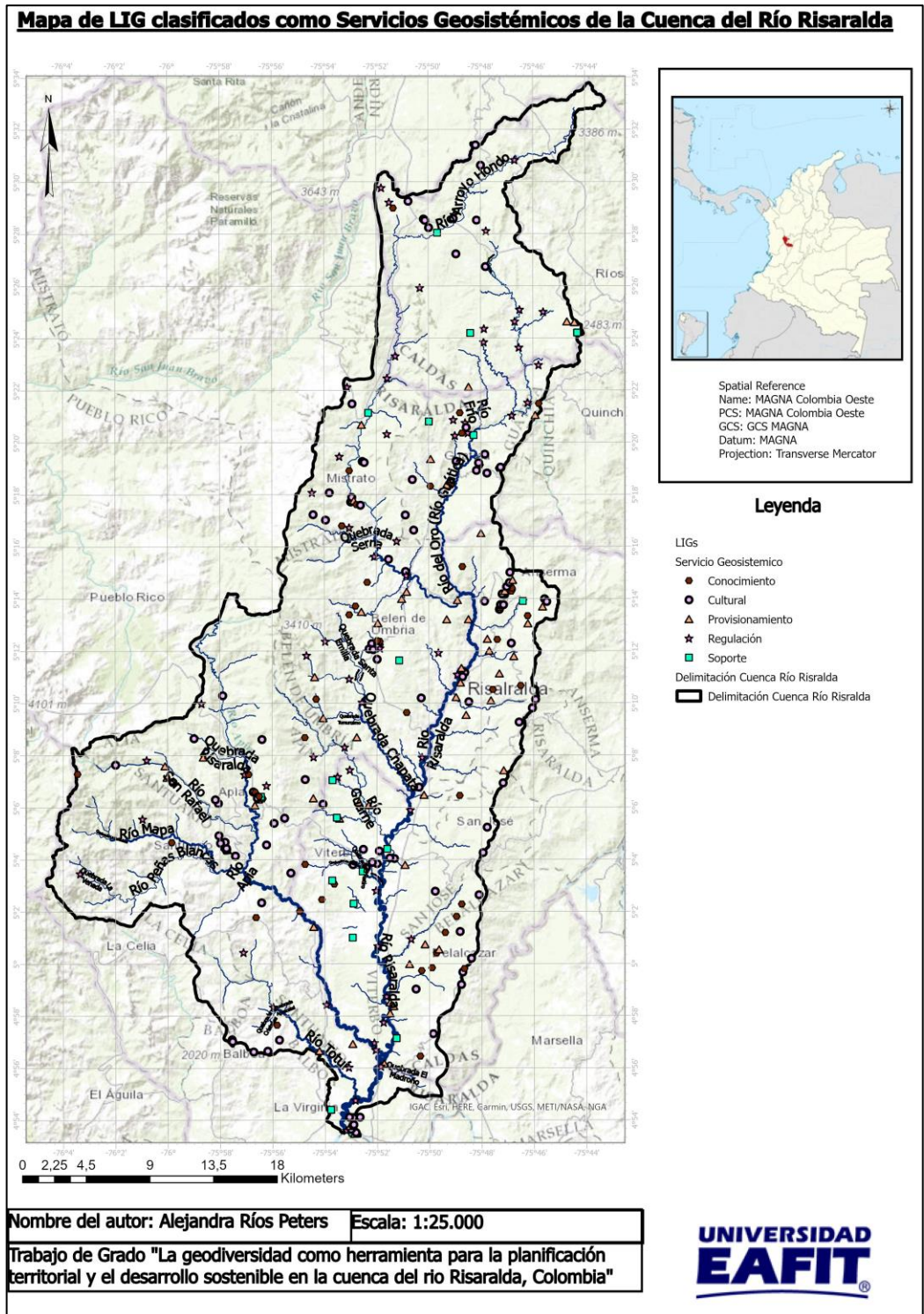
11. Superficie de sombras procesado a partir del DEM (NASA, 2023) con azimut 345 y altitud 45.



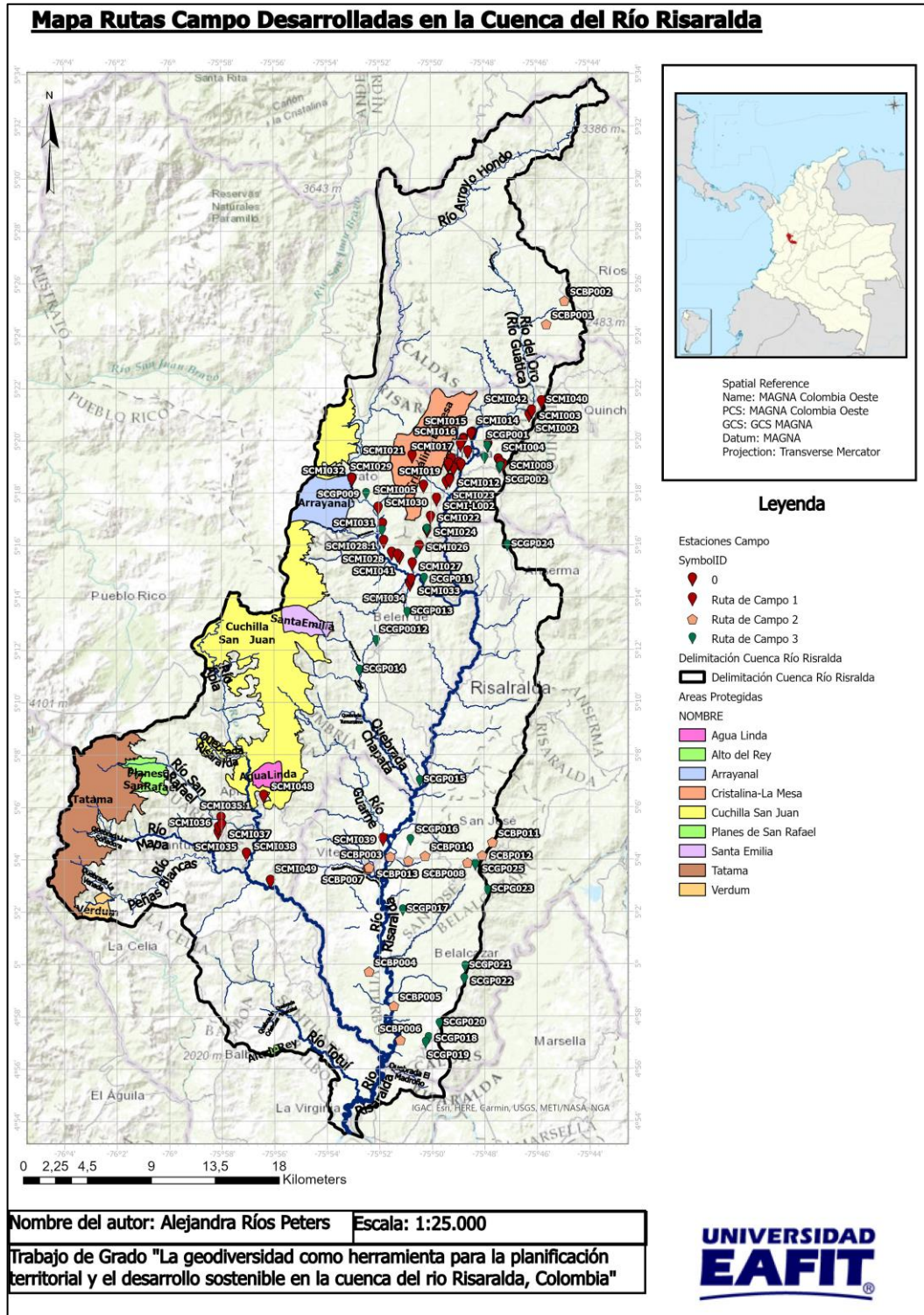
12. Capa de orientación de las laderas de la cuenca del Río Risaralda procesada del DEM con resolución 12.5 del satélite Alos Palsar (NASA, 2023).



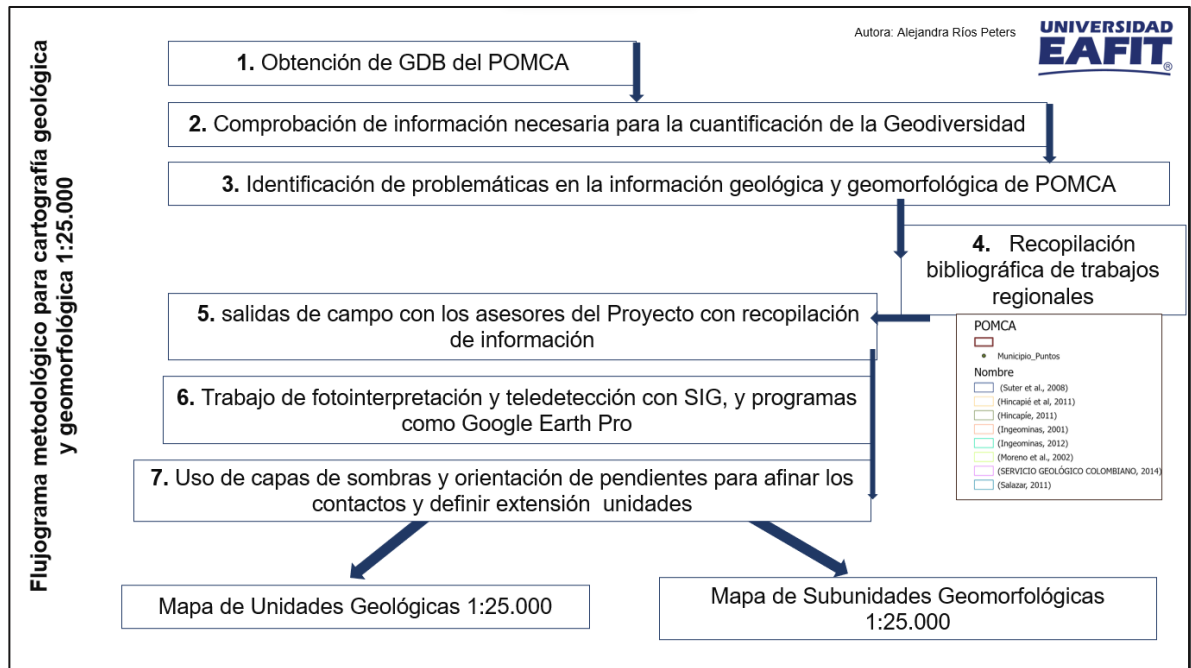
13. Mapa de Lugares de Interés Geológico (LIG) clasificados como servicios geosistémicos según lo establecido por Gray (2018).



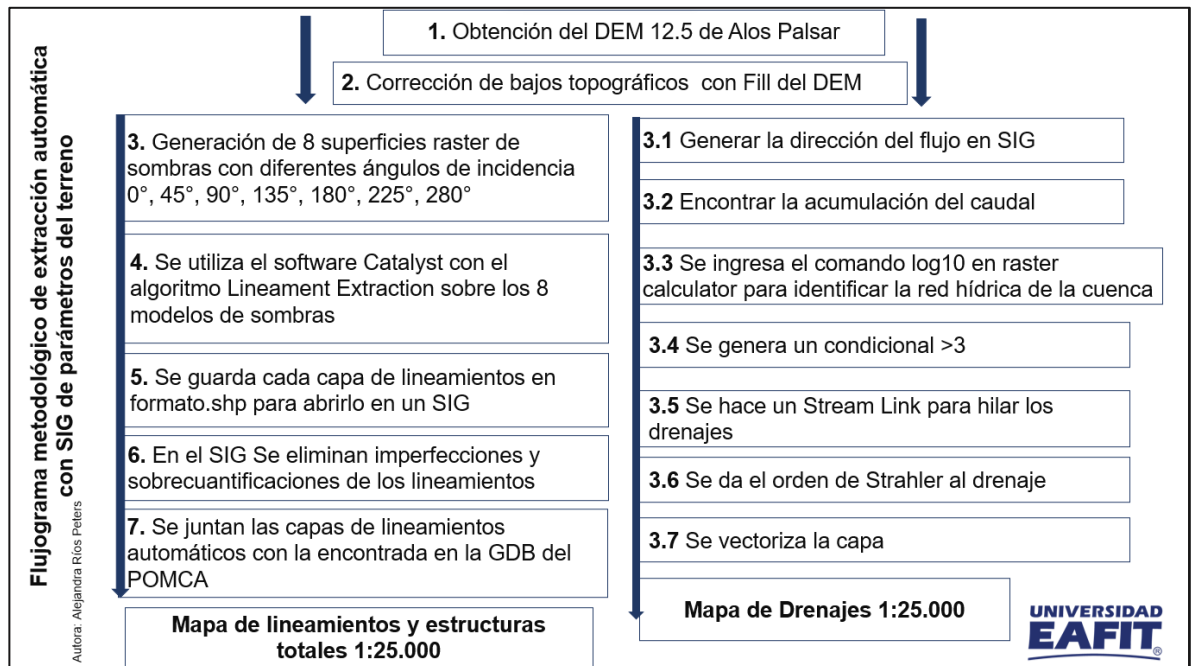
14. Mapa de rutas de campo desarrolladas en la zona de estudio para este trabajo de grado, autoría propia en ArcGIS Pro-3.1.



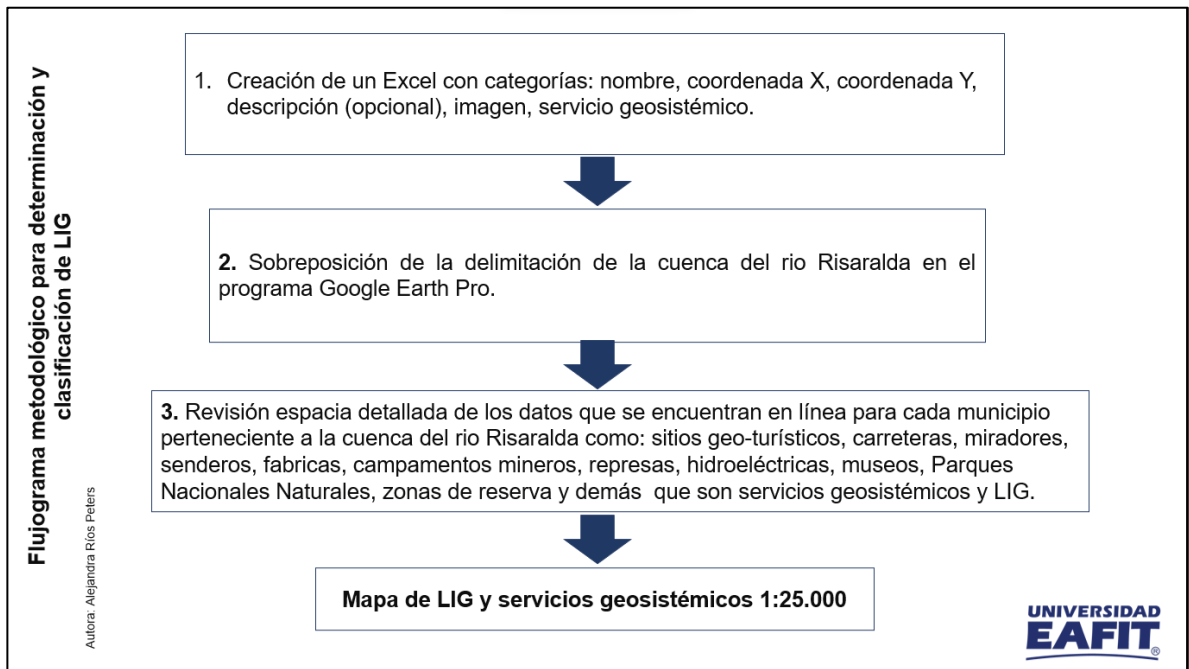
15. Flujograma metodológico para la obtención de cartografía geológica y geomorfológica 1:25.000, autoría propia.



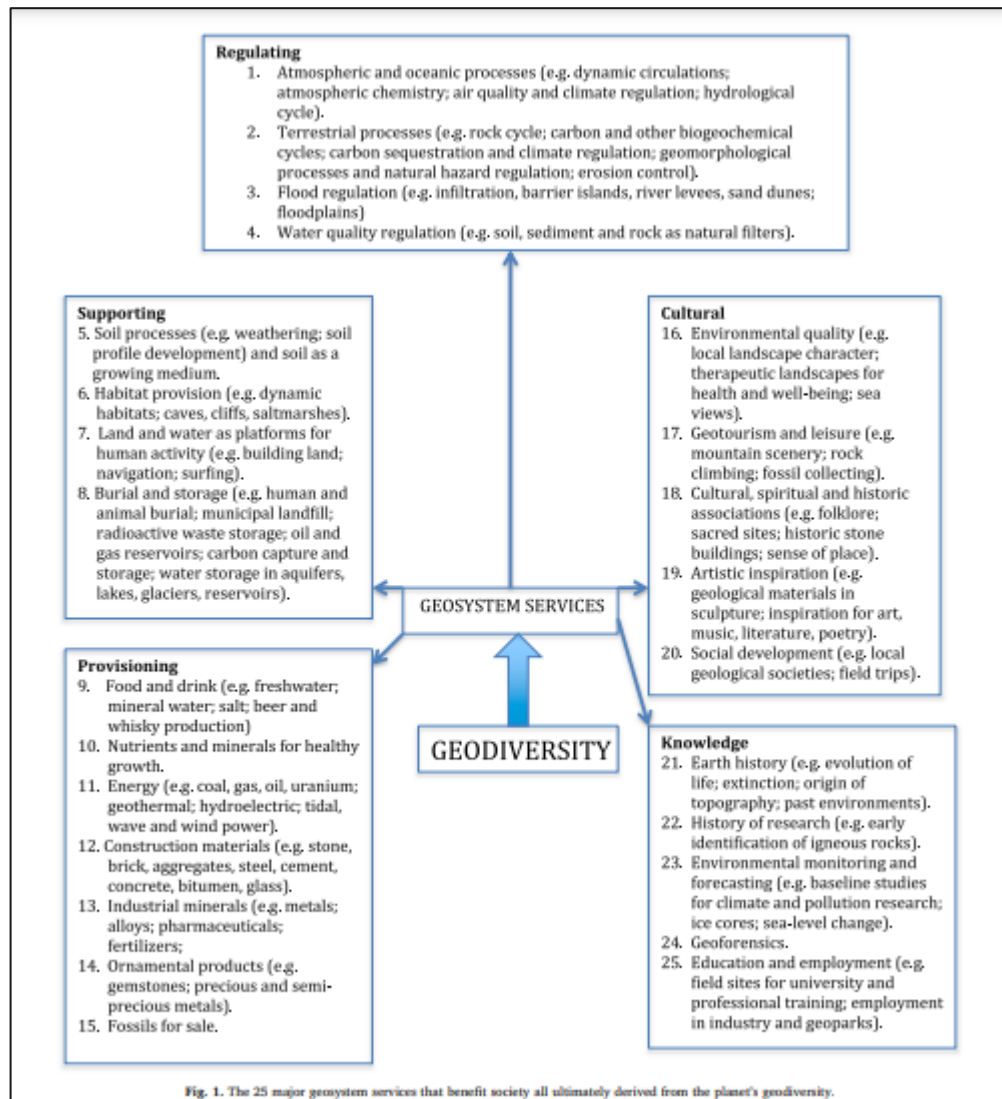
16. Flujograma metodológico aplicado a la extracción automática de parámetros del terreno como lineamientos/estructuras, y drenajes, autoría propia.



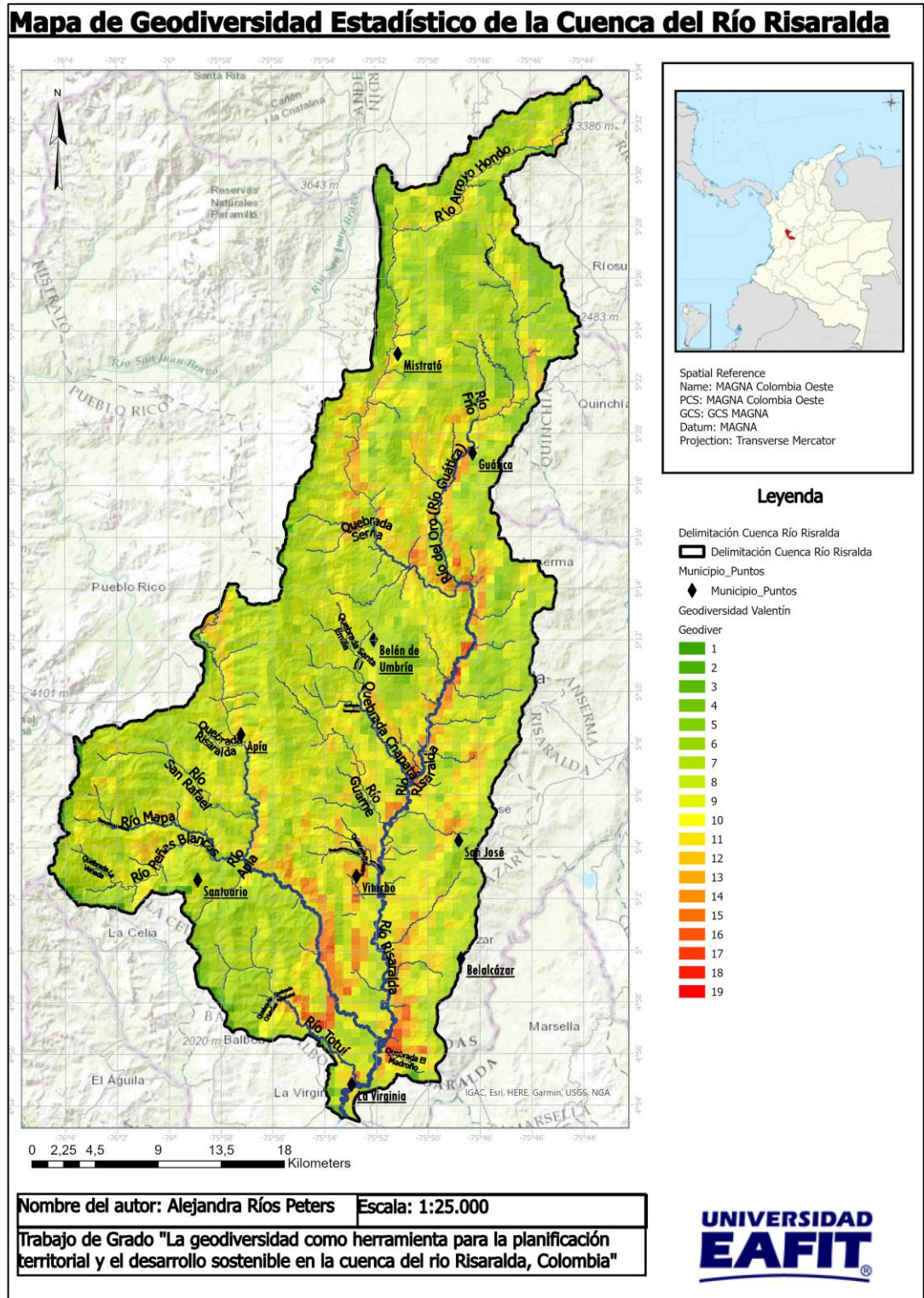
17. Flujograma metodológico para determinación y clasificación de LIG, autoría propia.



18. Clasificación de servicios geosistémicos tomado de Gray (2019).

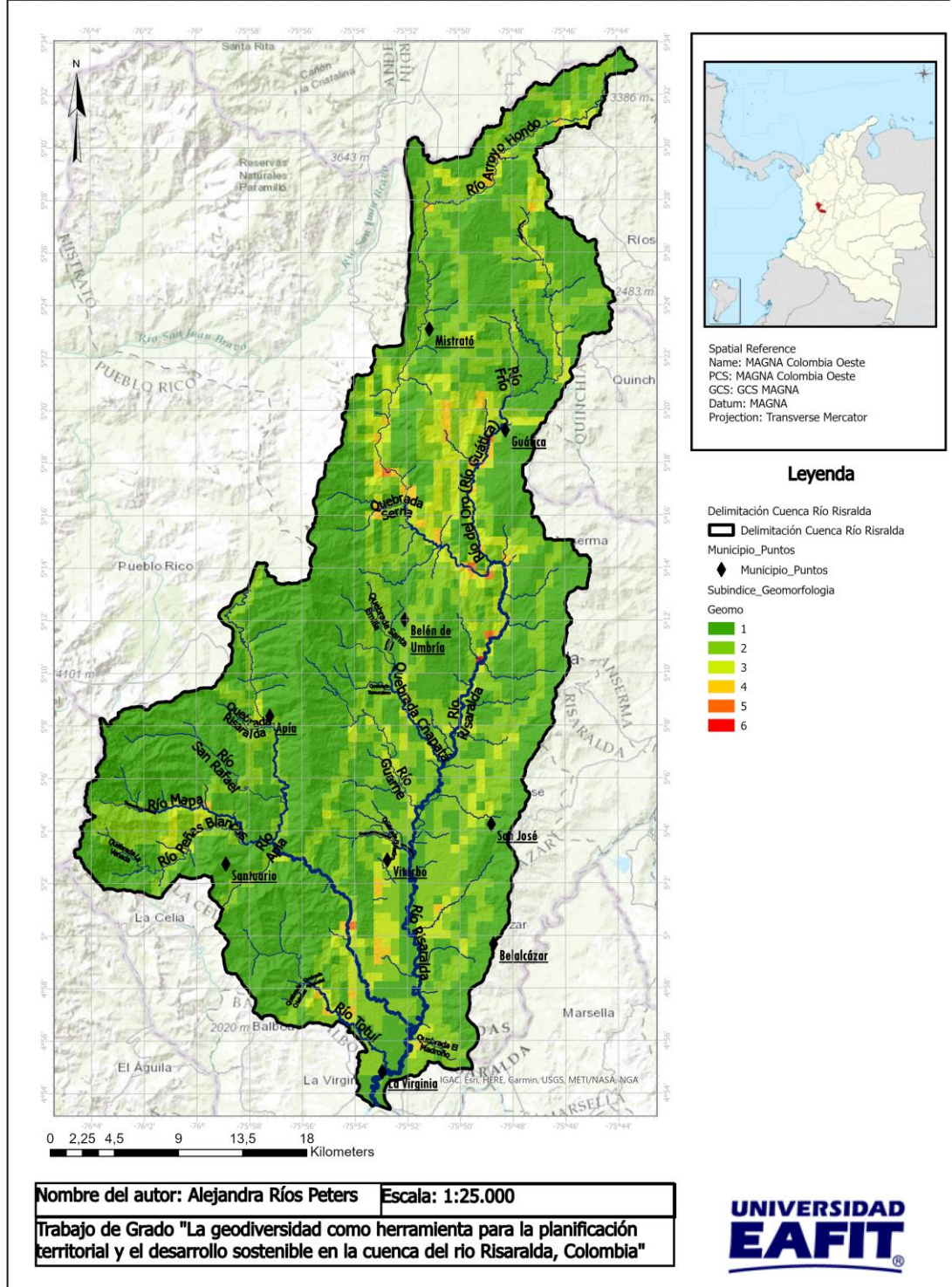


19. Mapa de Geodiversidad por metodología estadística en superficie vectorial con herramienta Valentín (2021) autoría propia en ArcGIS Pro 3.1.

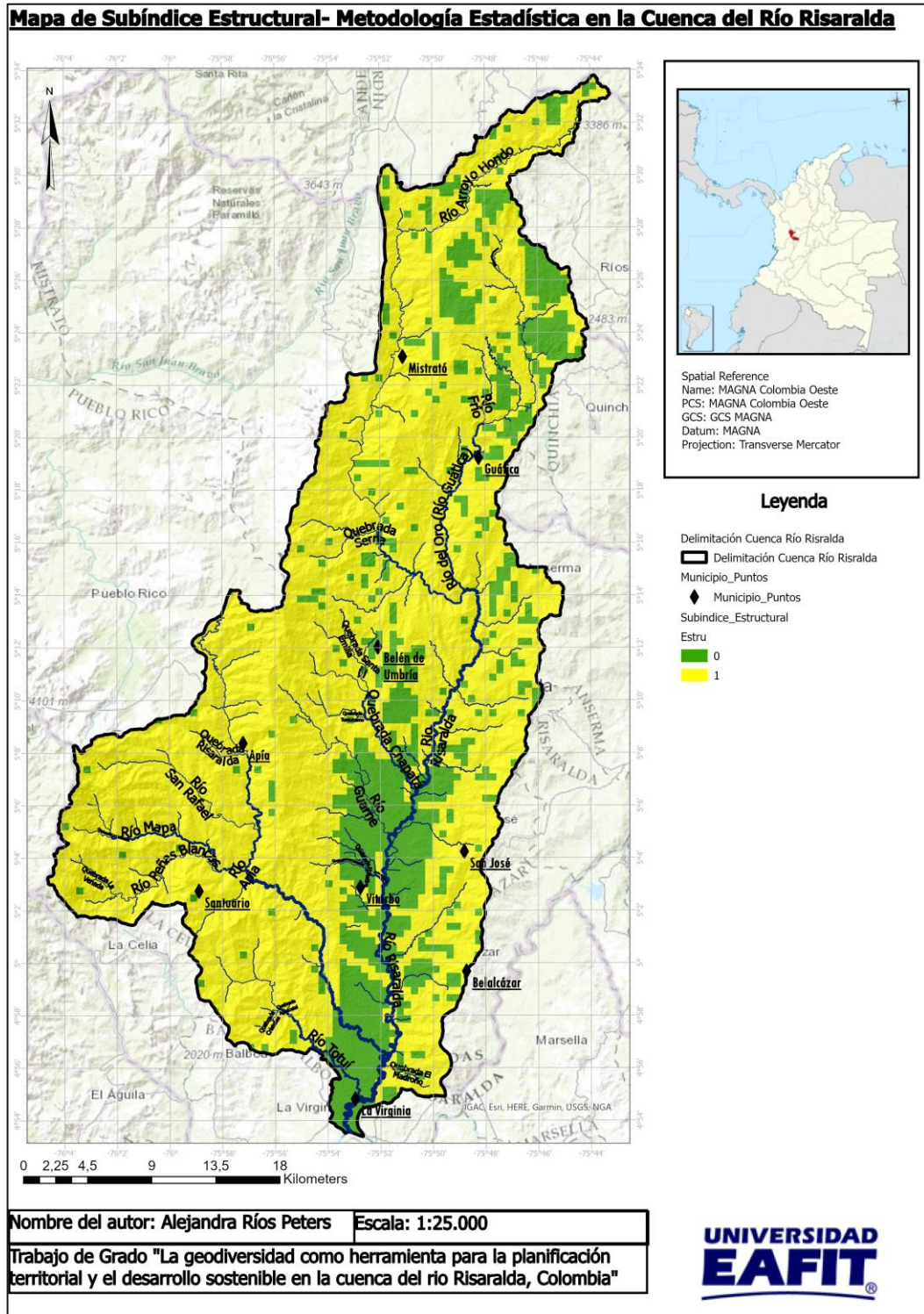


21. Mapa de subíndice geomorfológico obtenido con la herramienta de Valentín (2021) procesado en ArcGIS 3.1, autoría propia.

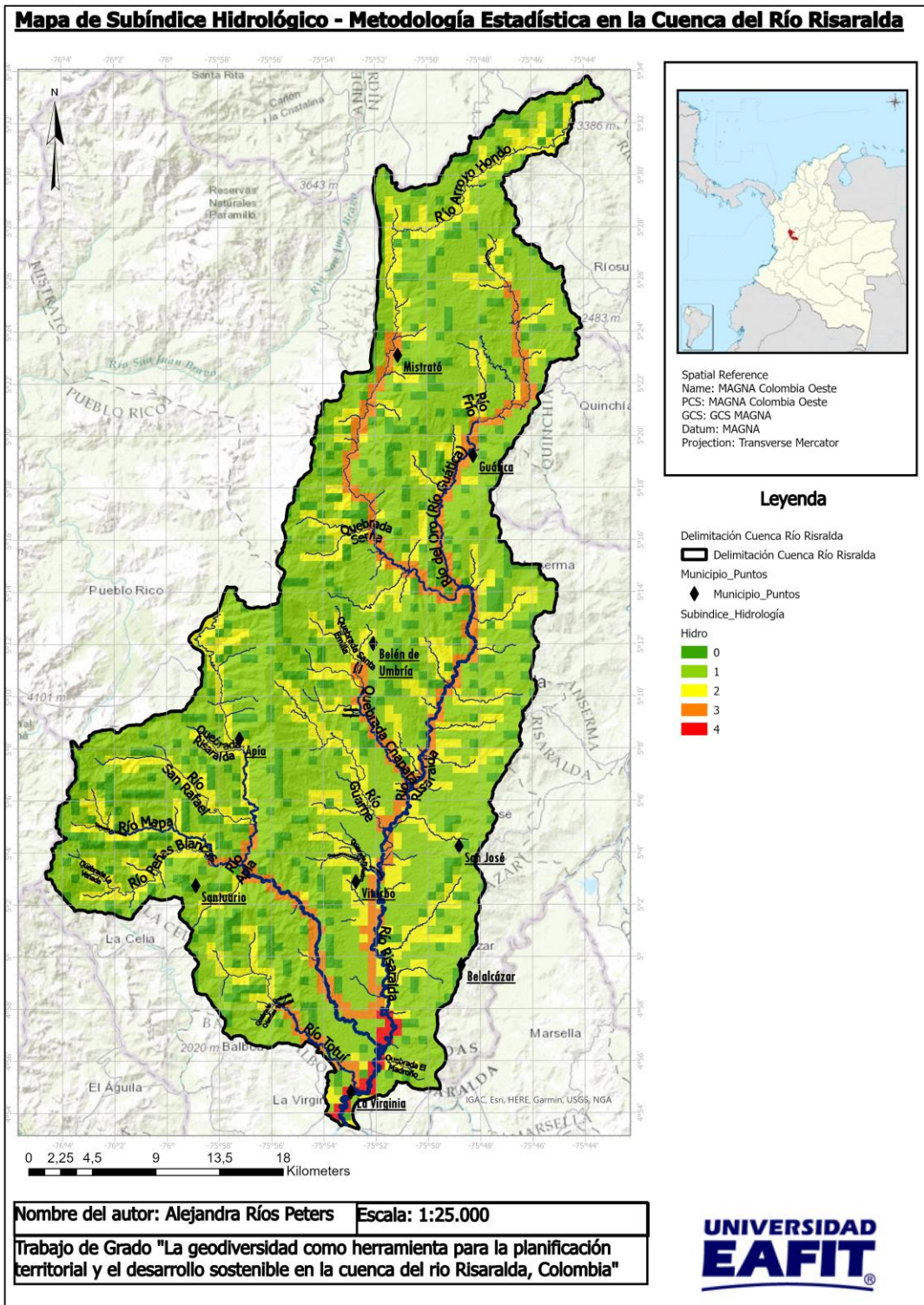
Mapa de Subíndice Geomorfológico - Metodología Estadística en la Cuenca del Río Risaralda



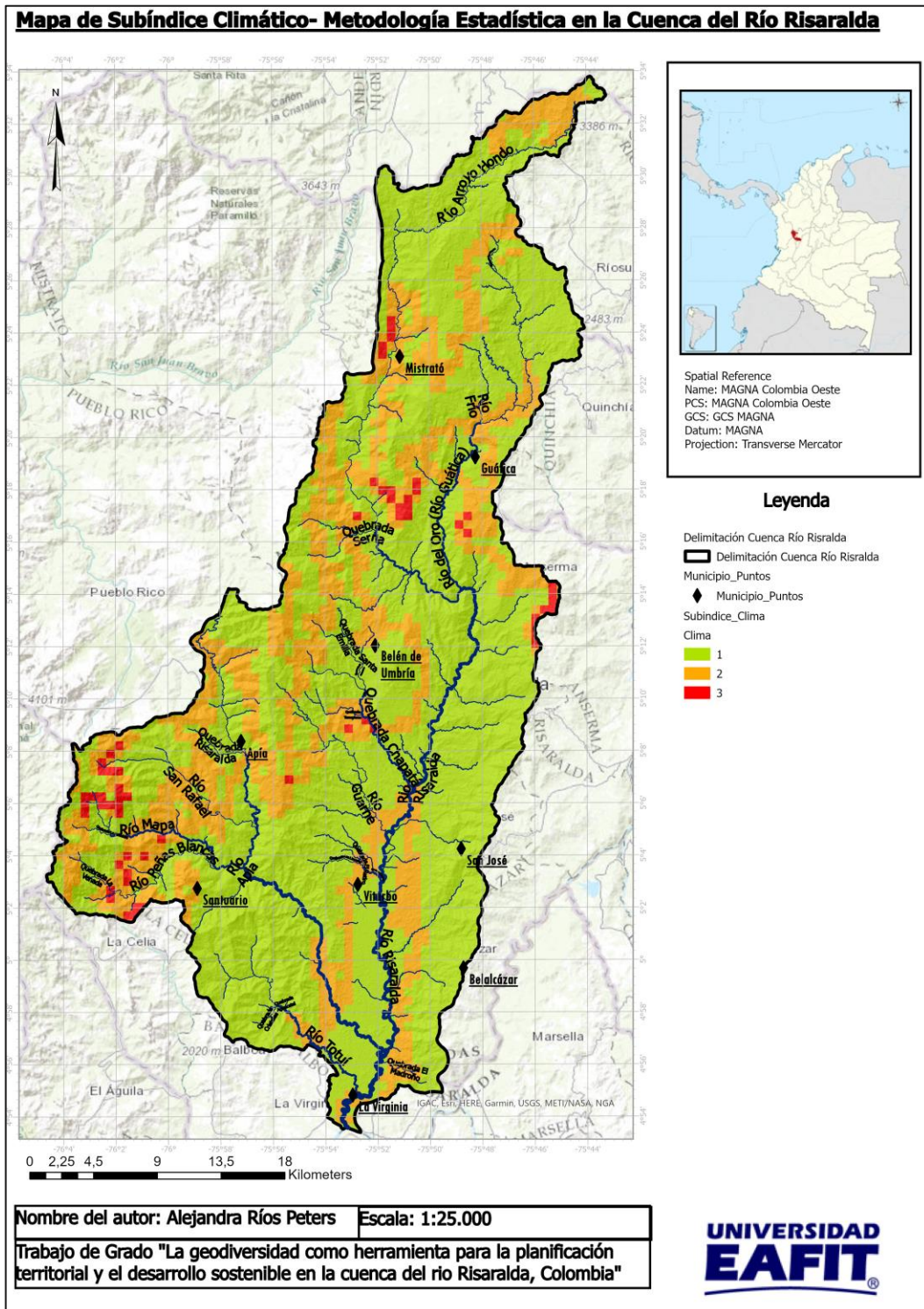
22. Mapa de subíndice estructural obtenido con la herramienta de Valentín (2021) procesado en ArcGIS 3.1, autoría propia.



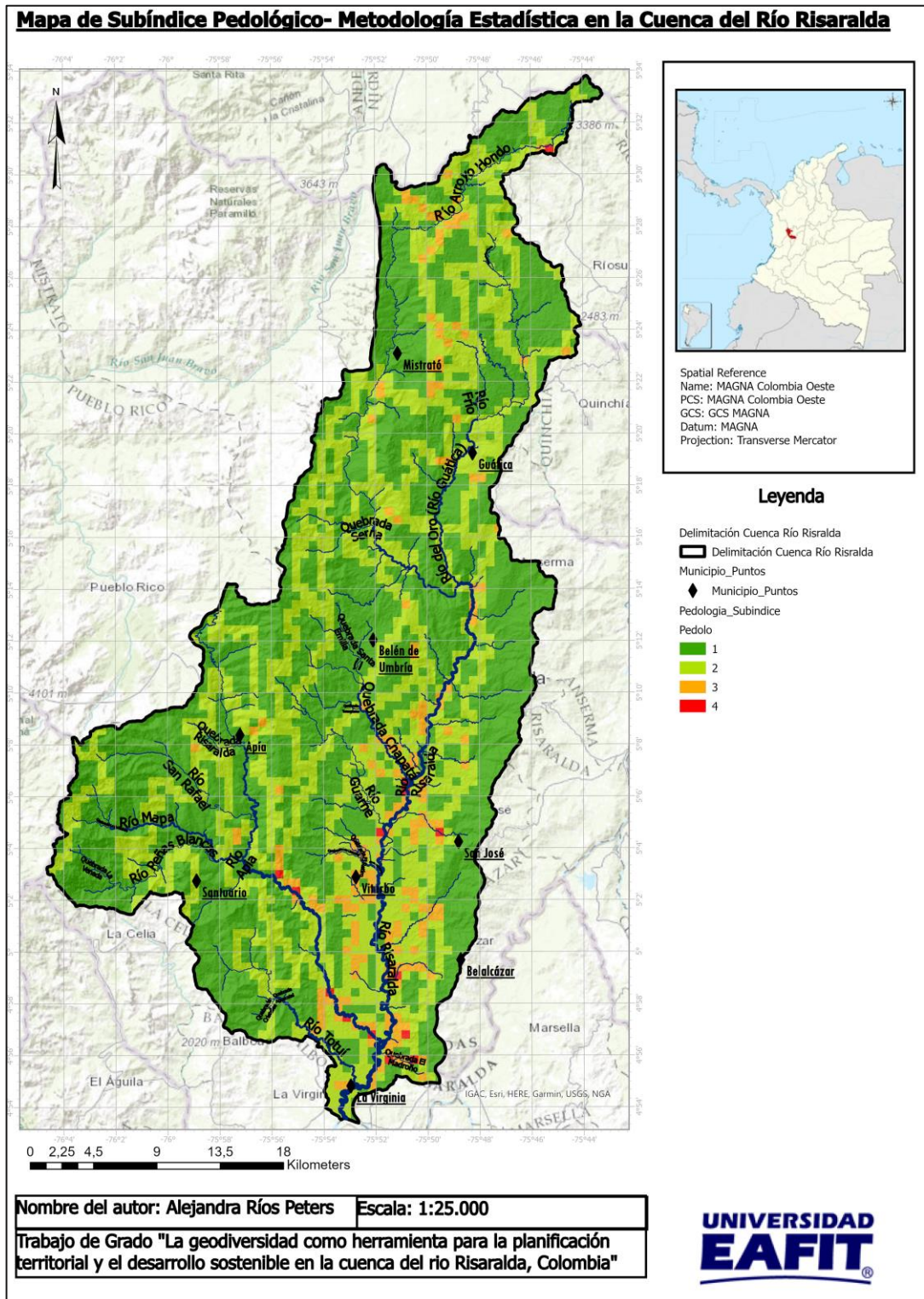
23. Mapa de subíndice hidrológico obtenido con la herramienta de Valentín (2021) procesado en ArcGIS 3.1, autoría propia.



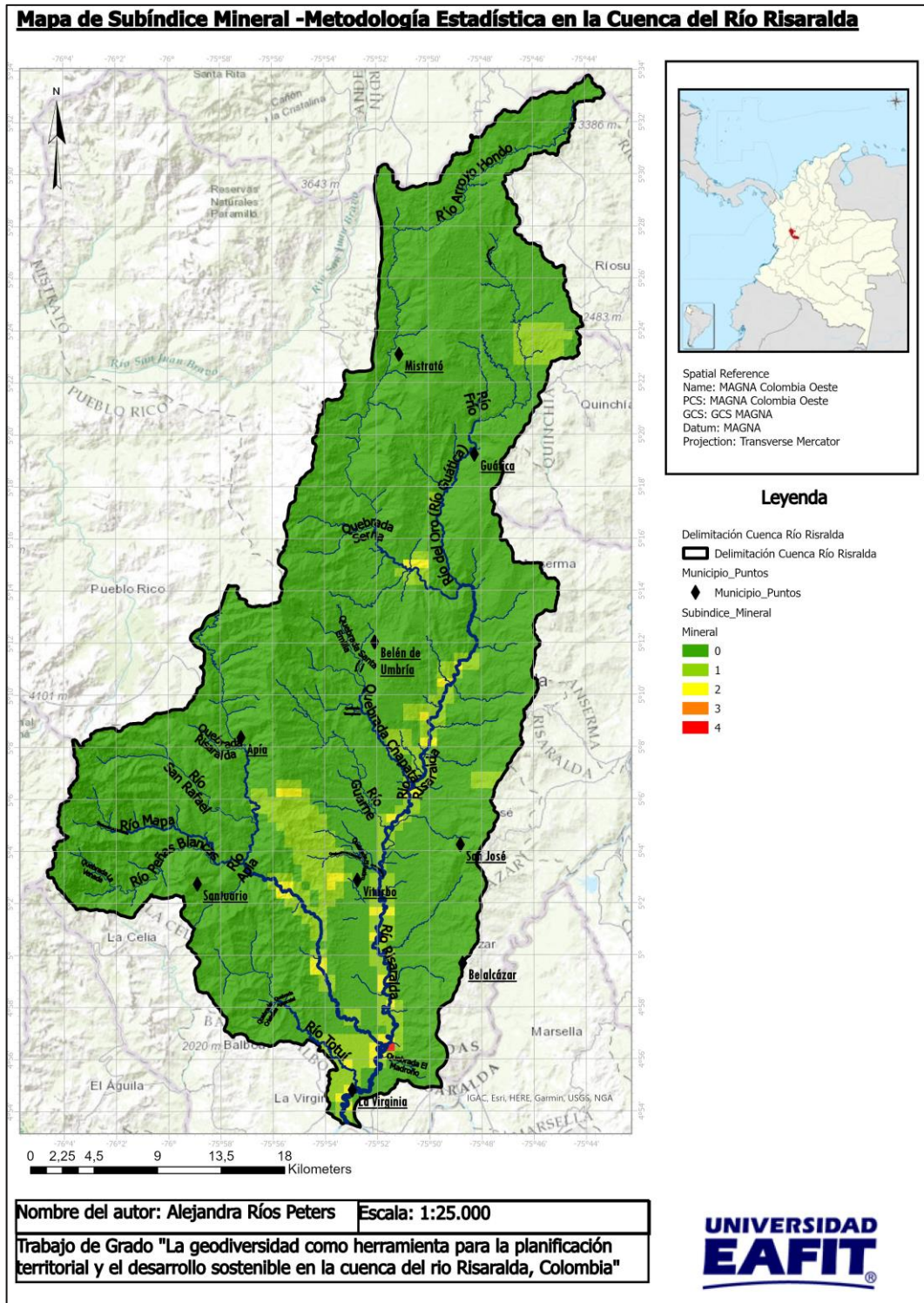
24. Mapa de subíndice climático obtenido con la herramienta de Valentín (2021) procesado en ArcGIS 3.1, autoría propia.



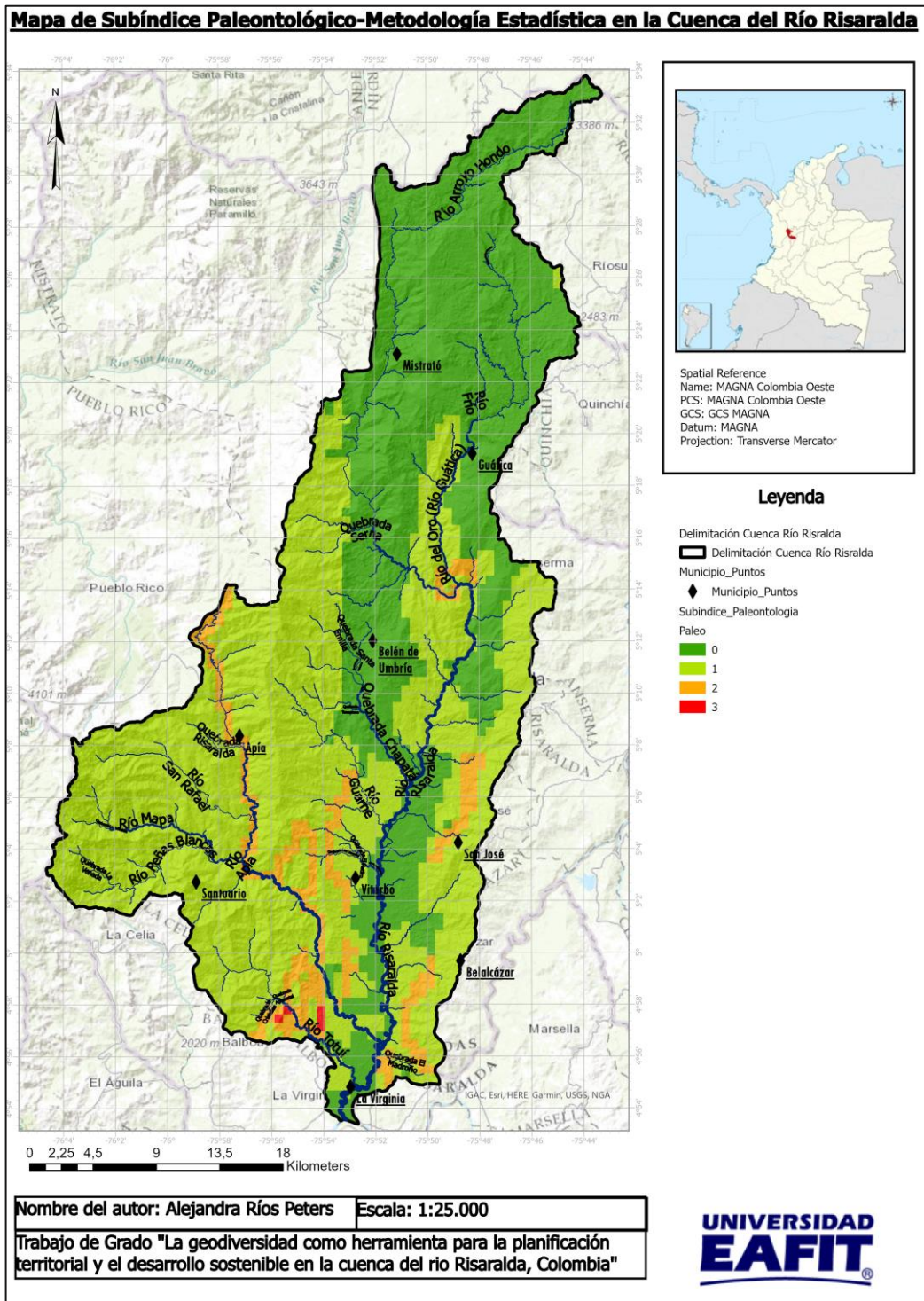
25. Mapa de subíndice pedológico obtenido con la herramienta de Valentín (2021) procesado en ArcGIS 3.1, autoría propia.



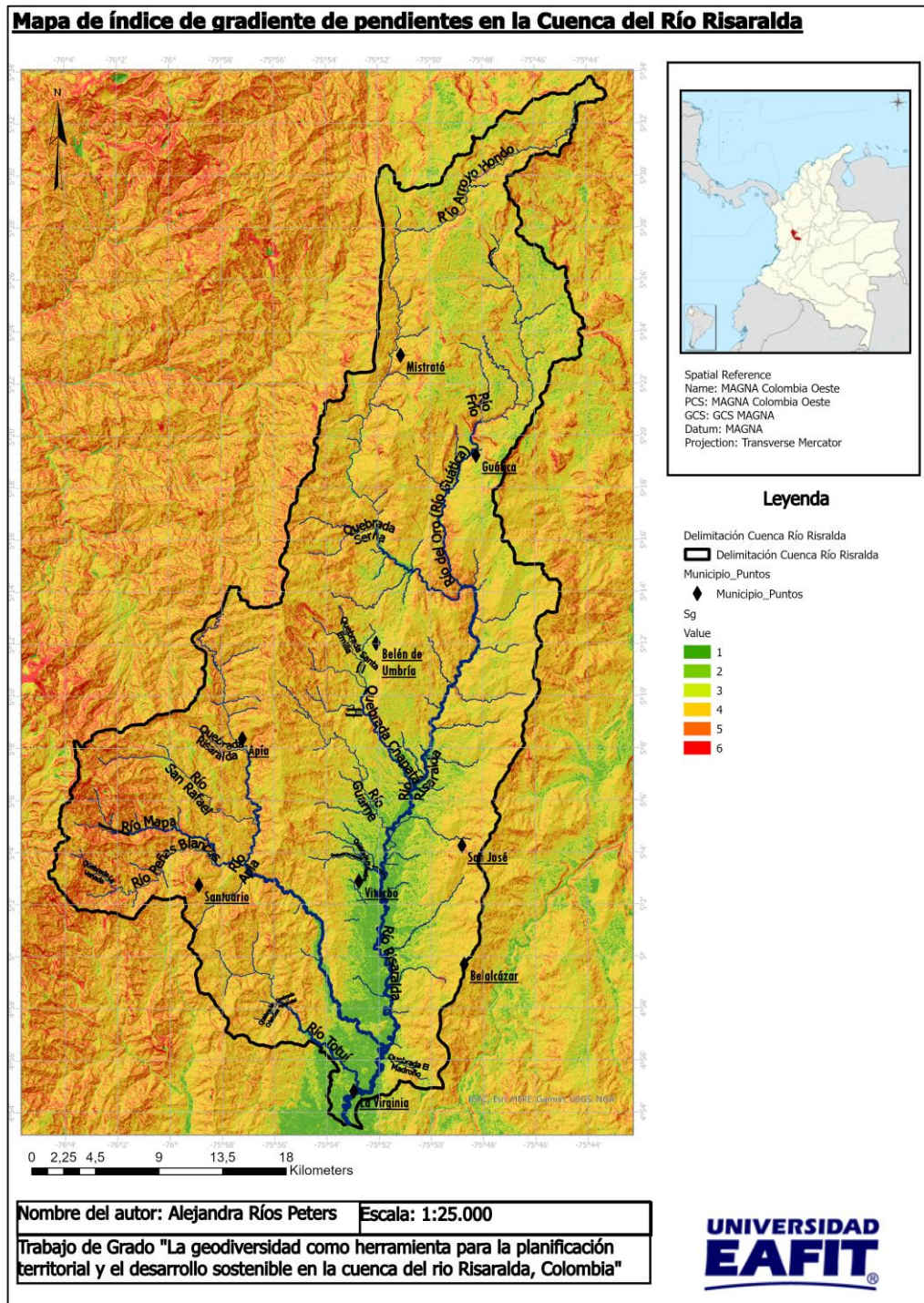
26. Mapa de subíndice pedológico obtenido con la herramienta de Valentín (2021) procesado en ArcGIS 3.1, autoría propia.



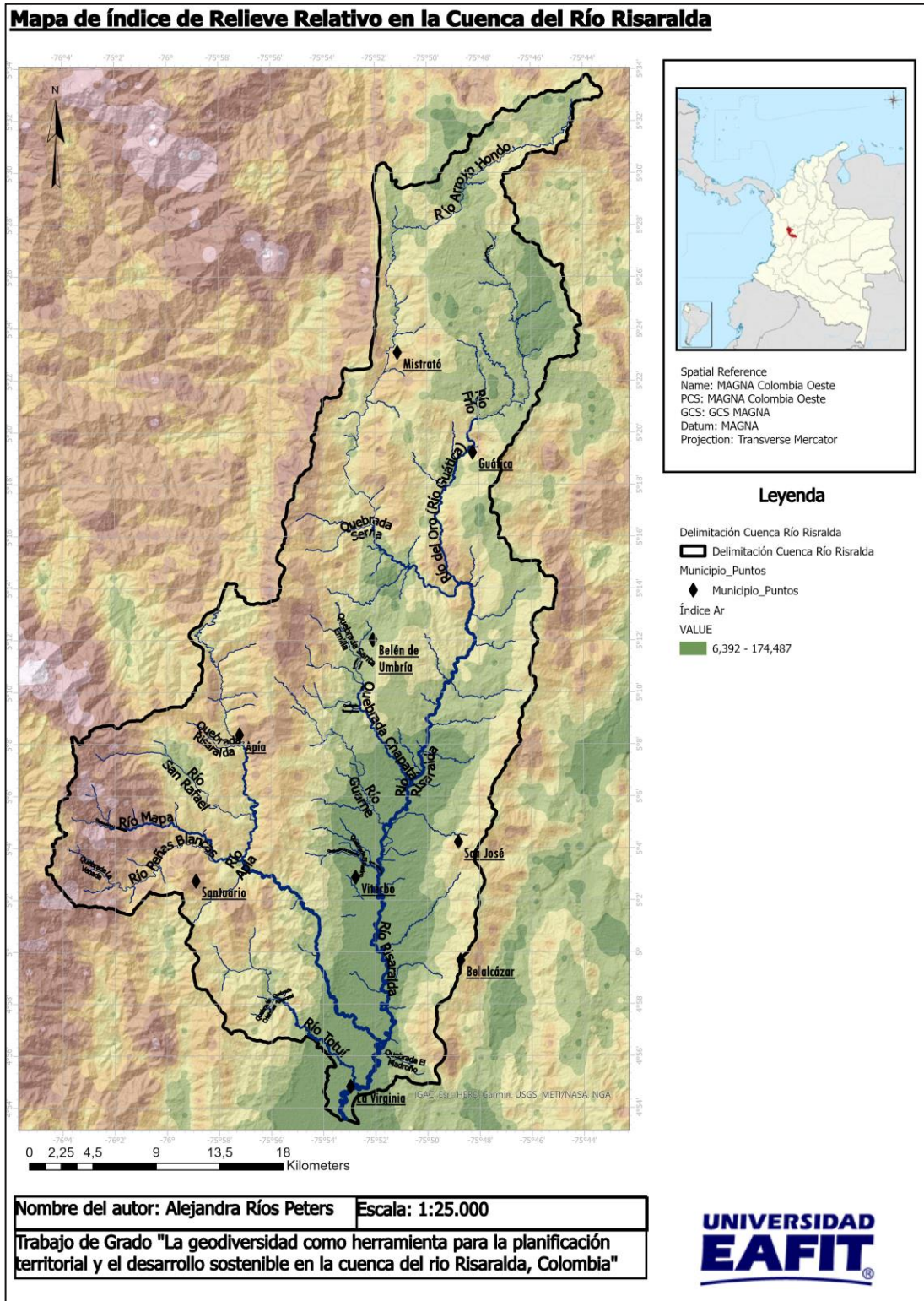
27. Mapa de subíndice paleontológico obtenido con la herramienta de Valentín (2021), procesado en ArcGIS 3.1, autoría propia.



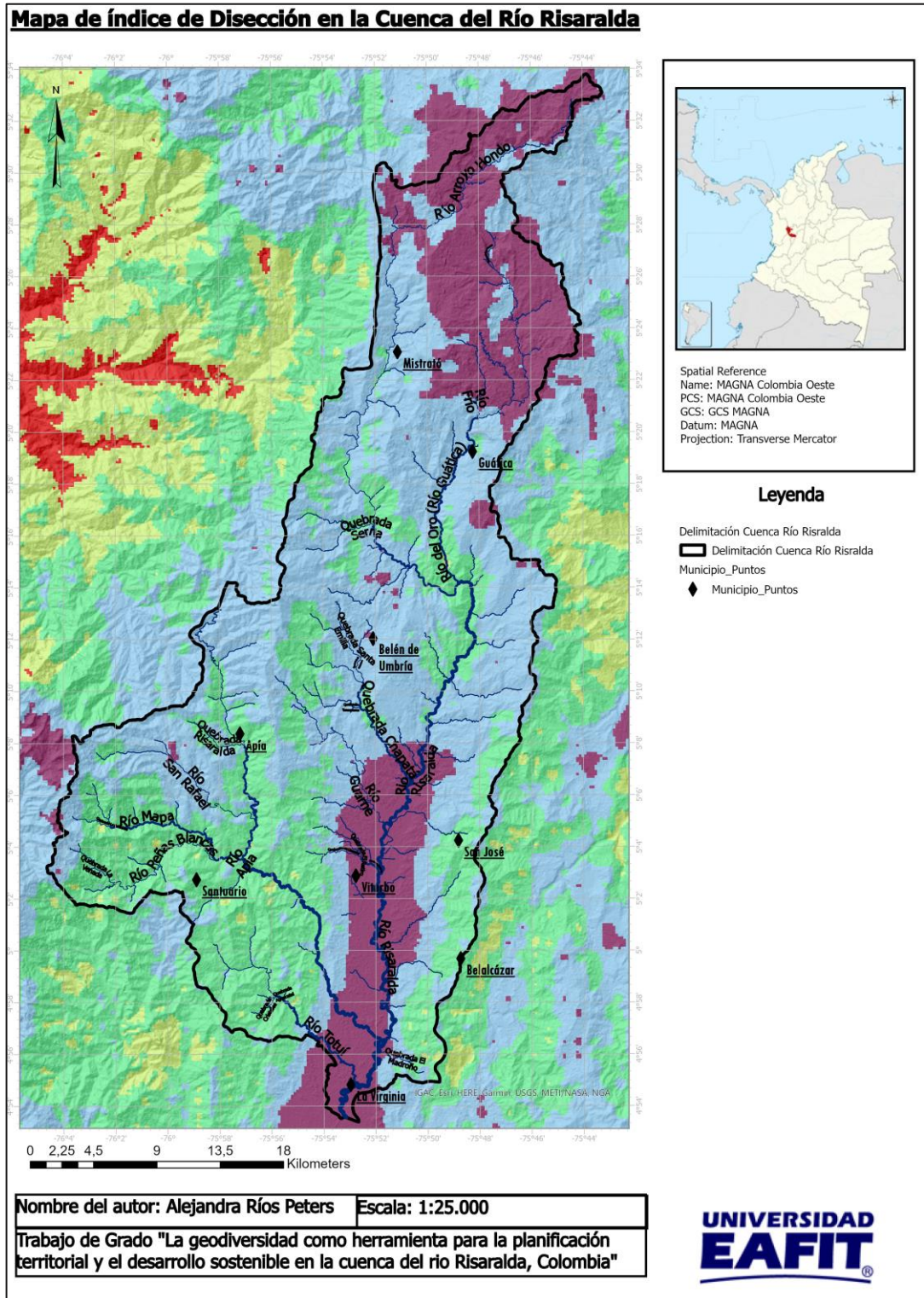
28. Mapa de índice de gradiente de pendientes obtenido a partir de procesamiento del DEM (NASA, 2023) en ArcGIS 3.1, autoría propia.



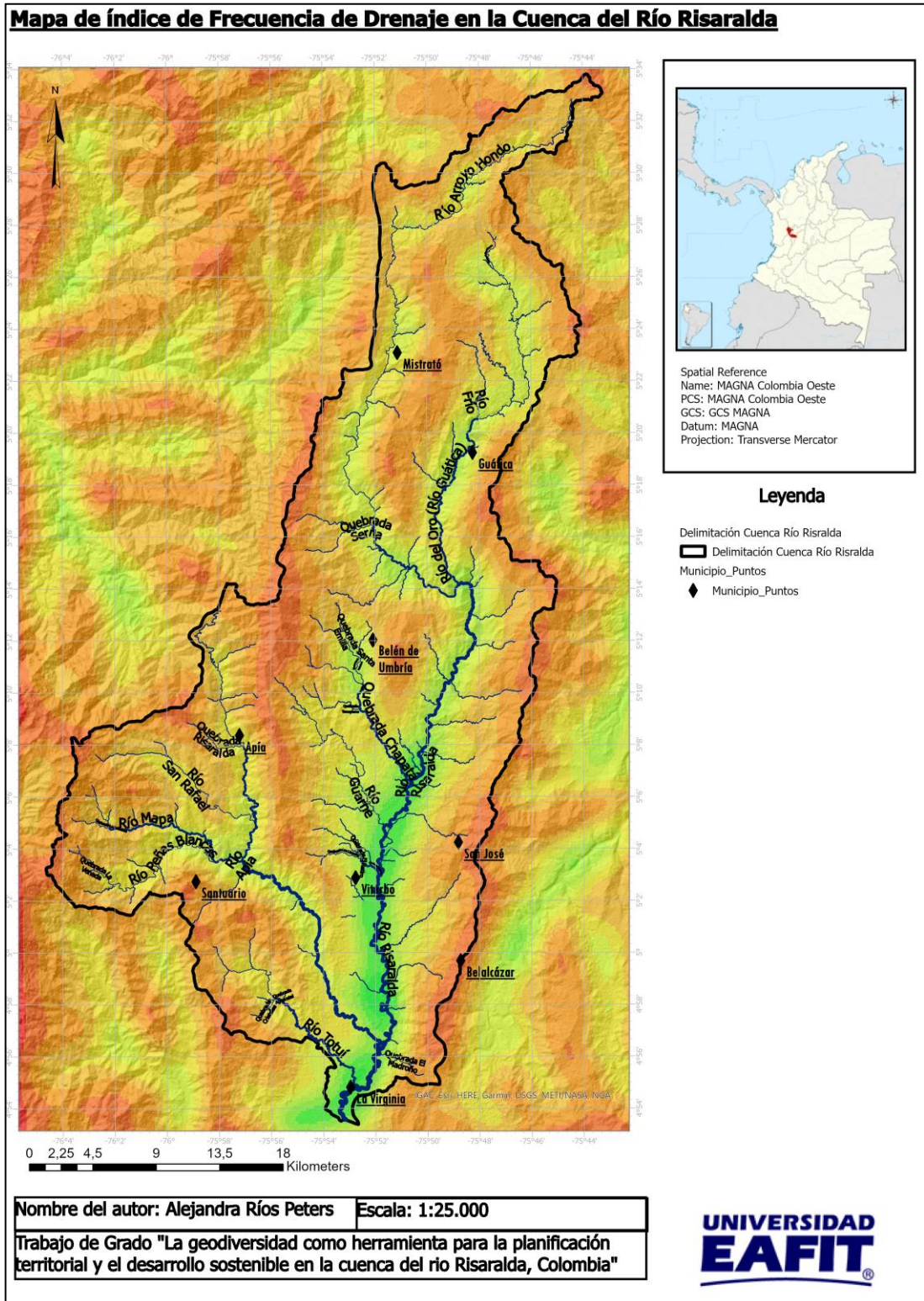
29. Mapa de índice de relieve relativo obtenido a partir de procesamiento del DEM (NASA, 2023) en ArcGIS 3.1, autoría propia.



30. Mapa de índice de disección obtenido a partir de procesamiento del DEM (NASA, 2023) en ArcGIS 3.1, autoría propia.



31. Mapa de índice de frecuencia de drenaje obtenido a partir de procesamiento del DEM (NASA, 2023) en ArcGIS 3.1, autoría propia.



32. Mapa de índice de humedad topográfica obtenido a partir de procesamiento del DEM (NASA, 2023) en ArcGIS 3.1, autoría propia.

