

**Estimación de la geodiversidad en la cuenca del río Palomino-  
Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta, como  
herramienta para la gestión integral del territorio**

**Elaborado por:** Leonardo Manuel Gutierrez Martinez.

**Trabajo de grado para optar el título de geólogo.**

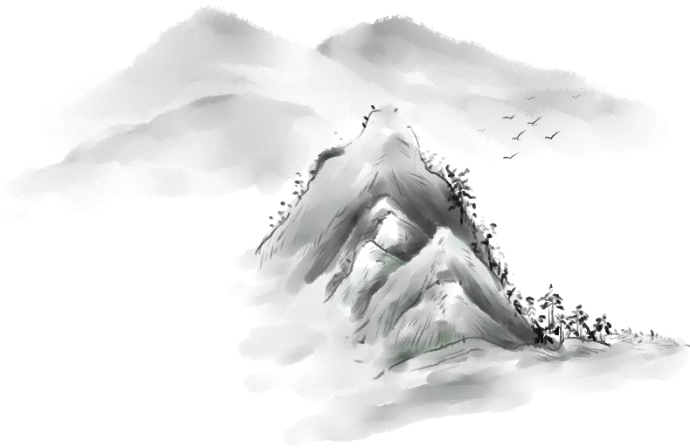
**Asesor:** María Isabel Marín Cerón, PhD.

**Escuela de Ciencias  
Departamento de Ciencias de la Tierra  
Universidad EAFIT  
Medellín, Colombia**

**2021**

## **Agradecimientos**

Le agradezco a mi familia por todo el apoyo, la confianza en cada idea y objetivo propuesto durante mi trayecto universitario, especialmente a mi madre que es una excelente copiloto y gran maestra de vida. A la profesora María Isabel Marín por siempre estar con los brazos abiertos, acompañarme en este proceso y por inspirar siempre la pasión científica. A los docentes de la universidad EAFIT y la universidad Complutense de Madrid que compartieron su sabiduría e hicieron de mí una persona más ética y profesional. A los amigos que alentaron cada página, que me acompañaron en cada viaje y siempre estuvieron presentes tanto en Colombia como en España. Finalmente, al océano y a la montaña por permitirme conocerlos y comprenderlos un poco más durante esta travesía.



“La naturaleza no hace nada en vano”

*Aristóteles*

## Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
<b>2. Marco Conceptual</b>	<b>9</b>
2.1. Geodiversidad y conceptos afines	10
2.2. Marco normativo e institucional colombiano	13
2.3. Geodiversidad y objetivos de desarrollo sostenible	16
<b>3. Caracterización Geosferica del área</b>	<b>18</b>
3.1. Geodinámica del bloque Maracaibo	20
3.2. PNN Sierra Nevada de Santa Marta	24
<b>4. Marco Científico</b>	<b>25</b>
4.1. Conformación de la base de datos e inventario de Lugares de Interés	26
4.2. Estimación de la geodiversidad con el Modelo multicapa. ( <i>Najwer et al., 2016</i> ).	28
4.2.1. Valoración geomorfológica	29
4.2.2. Valoración bioclimática	29
4.2.3. Valoración geológica	29
4.2.4. Valoración de geodiversidad	29
4.3. Modelo de densidad de elementos abióticos. ( <b>Valentin, 2021</b> )	<b>32</b>
4.4. Método Heurístico adaptado	<b>34</b>
<b>5. Resultados</b>	<b>36</b>
5.1. Conformación de la base de datos e inventario de lugares de interés	36
5.1.1. Historia geológica	38
5.1.2. Inventario de lugares de interés	40
5.2. Cálculo de la geodiversidad por medio del modelo multicapa ( <i>Najwer et al., 2016</i> )	45
5.3. Cálculo de la geodiversidad por medio del modelo multicapa ( <i>Valentin, 2021</i> )	49
5.4. Cálculo de la geodiversidad por medio de la metodología heurística	52
<b>6. Discusión</b>	<b>54</b>
6.1. Análisis de las metodologías	56
6.2. Validación de geodiversidad	57

6.3. Gestión integral y geoturismo	61
<b>7. Conclusiones</b>	<b>63</b>
<b>8. Referencias</b>	<b>65</b>

### **Contenido de figuras**

<b>Figura 1.</b> Distribución de geoparques, aspiraciones e iniciativas en el continente suramericano. (Rosado-González et al. 2008).	<b>9</b>
<b>Figura 2.</b> Marco conceptual de la geodiversidad, el patrimonio geológico y la geoconservación, teniendo en cuenta el alcance de la geoconservación. (Brilha et al., 2016).	<b>13</b>
<b>Figura 3.</b> Sección esquemática del desarrollo de los objetivos de desarrollo sostenible en geoparques de América Latina (Rosado-González et al. 2008).	<b>17</b>
<b>Figura 4.</b> Ubicación de PNN SNSM (polígono naranja) y Cuenca hidrográfica río Palomino (polígono rojo).	<b>19</b>
<b>Figura 5.</b> Climograma cuenca río Palomino. Tomado y modificado de Climate Data.ORG	<b>20</b>
<b>Figura 6.</b> a) Características tectónicas del bloque Maracaibo (Colmenares et al., 2003) b) Mapa generalizado de la Sierra Nevada de Santa Marta y Serranía de Perijá diferenciando unidades pre-Cenozoicas por su edad y composición, y estructuras mayores. (Bayona et al., 2007)	<b>22</b>
<b>Figura 7.</b> Bloque diagrama donde ilustra la interacción de las suturas en el margen norte de Colombia. (Cediel F., 2019)	<b>23</b>
<b>Figura 8.</b> Flujograma metodológico para la cuantificación de geodiversidad en la cuenca del río Palomino	<b>26</b>
<b>Figura 9.</b> Mapa de ubicación de los estudios realizados en la cuenca del río palomino en PNN SNSM, y bloque Maracaibo.	<b>38</b>
<b>Figura 10.</b> Modelo de la descripción de los lugares de interés geológico de la zona de estudio	

<b>Figura 11.</b> Cálculo de Geodiversidad. Tomado y modificado de Valentin. 2021	<b>34</b>
<b>Figura 12.</b> Mapa de inventario geositios en la cuenca del rio Palomino.	<b>45</b>
<b>Figura 13.</b> Capas de entrada geológica, geomorfológica, bioclimática para la valoración de geodiversidad a partir de la metodología de Najwer et al., 2016.	<b>46</b>
<b>Figura 14.</b> Mapa índice de geodiversidad metodología Najwer et al., 2016.	<b>47</b>
<b>Figura 15.</b> Porcentaje del índice de importancia para el método Najwer et al., 2016. G	<b>48</b>
<b>Figura 16.</b> Mapa de geodiversidad a partir de la metodología Valentin, 2021.	<b>50</b>
<b>Figura 17:</b> Porcentaje de cuadrantes para elementos abióticos. (Valentin, 2021).	<b>51</b>
<b>Figura 18.</b> Distribución porcentual de la geodiversidad a partir de la metodología heurística.	<b>53</b>
<b>Figura 19.</b> Mapa de geodiversidad mediante la metodología heurística.	<b>54</b>
<b>Figura 20.</b> Actividades ecoturísticas en rio Palomino.	<b>59</b>
<b>Figura 21.</b> Desembocadura del rio palomino en el mar Caribe.	<b>60</b>
<b>Figura 22.</b> Fotografía panorámica de la cuenca del rio Palomino aguas arriba (Factor paisajístico)	<b>60</b>
<b>Figura 23.</b> Mapa de metodología Valentin, (2021), junto con la delimitación de zonas de protección por Runap, (2018) y INDEREMA, (1971)	<b>62</b>

### **Contenido de tablas**

<b>Tabla 1.</b> Características distintivas para los métodos cuantitativos-cualitativos Najwer et al., (2016) y Valentin (2021)	<b>28</b>
<b>Tabla 2.</b> Valores de clasificación de las variables, según el parámetro y el valor de geodiversidad, para la metodología de Najwer et al., (2016)	<b>31</b>
<b>Tabla 3.</b> Valores de clasificación de las variables, según el parámetro y el valor de geodiversidad, para la metodología heurística.	<b>35</b>

**Tabla 4.** División de las subcuencas que conforman la cuenca del río Palomino **37**

**Tabla 5.** Tabla de los lugares de interés geológico propuestos por el experto y su porcentaje de importancia **41**

**Table 6.** Municipios que componen el PNN y las hectáreas de protección. **58**

### **Contenido de fotografías**

**Fotografía 1.** Parque Nacional Natural Los Nevados-Nevado del Tolima **9**

**Fotografía 2.** Parque Nacional Natural Cañón del Chicamocha **9**

**Fotografía 3.** Actividades ecoturísticas en río Palomino. **59**

**Fotografía 4.** Desembocadura del río palomino en el mar Caribe. **60**

**Fotografía 5.** Fotografía panorámica de la cuenca del río Palomino aguas arriba (Factor paisajístico). **60**

# **Estimación de la geodiversidad en la cuenca del río Palomino- Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta, como herramienta para la gestión integral del territorio**

## **Resumen**

La geodiversidad es un parámetro importante para valorizar y difundir los conocimientos sobre la historia de la tierra, en un área con características geológicas especiales (UNESCO,2015). Esto junto a la biodiversidad, conforman dos factores importantes que permiten que exista un equilibrio en el ecosistema terrestre, que, a su vez, aportan información para comprender los procesos físicos que actúan sobre la corteza terrestre y proporcionen una mejor eficacia a la hora de toma de decisiones, planificación, gestión de los recursos naturales y/o patrimonio geológico. Al norte de Colombia se encuentra la zona del Caribe, donde se ubica el bloque Maracaibo, el cual hace parte de una formación estructural del país fundamental, ya que actúa como una microplaca continental autóctona y revela los procesos que han tenido influencia en el pasado respecto a la neotectónica; dentro de este bloque se encuentra la cuenca Cesar-Ranchería, la cual es de gran importancia económica y ambiental para el país; en ella se localizan el orógeno: SNSM, el cual representan una extensa área de la región caribe y cuentan con una gran variedad de recursos naturales como: metales de interés económico, agua, fauna, flora, entre otros; toda esta diversidad está directamente influenciada por la variedad de pisos térmicos que presenta dicho orógeno. Dentro de la cuenca del río Palomino existen 10 subcuencas que se ubican en el sector occidental del departamento de la Guajira, limitado con el departamento del Magdalena desembocando en el mar caribe con un área de  $68,4 \text{ km}^2$ . El propósito fundamental de este trabajo reside en generar una divulgación científica que despierte el interés en la conservación y preservación del patrimonio geológico y la geodiversidad de la región, fomentando el aprendizaje por medio de organismos como Parques Nacionales Naturales de Colombia, zonas protegidas, entre otros, los cuales permitan un mejor desarrollo educativo, social, económico y ambiental.

# 1. INTRODUCCIÓN

En el planeta existen variables físicas que interactúan en la superficie de la corteza terrestre, estas son las encargadas de que exista un modelamiento del relieve, produciendo así geoformas que, junto a observaciones y análisis, pueden llegar a generar un conocimiento sobre la evolución histórica que han sufrido la corteza el aérea de estudio a lo largo del tiempo (Benito-Calvo, Perez-Gonzales, Magri, & Mesa, 2009).

La teoría de geodiversidad fue introducida en el año 1993 en la Cumbre de la Tierra de Rio, donde la comunidad científica da por hecho que se deben comprender y dar importancia al gran volumen de componentes abióticos en la geosfera preservados en el registro evolutivo, debido a esto, se decide independizar la palabra “Geodiversidad” del término “Biodiversidad” en las negociaciones de la cumbre.

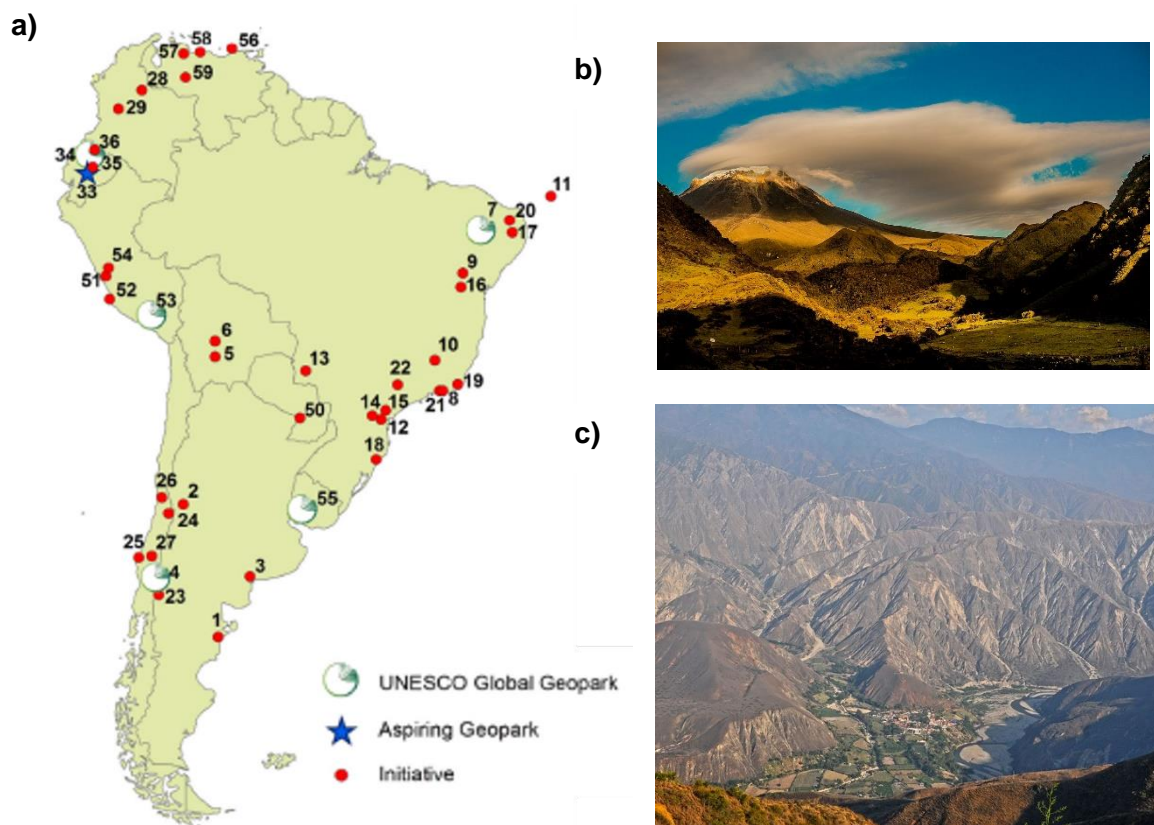
Una de las ventajas que manifiesta el interés en Geodiversidad y Patrimonio Geológico, es que puede llegar a generar ambientes donde pueda ser entendida, valorada y conservada un área con características abióticas especiales, dando un sentido relevante en la forma en que se vive y trabaja, contribuyendo a una mejor toma de decisiones y un buen recurso didáctico con importancia cultural y un aprovechamiento potencial de los recursos como motor de desarrollo socioeconómico local (Carcavilla, Lopez-Martinez, & Duran, 2007) (Geoconservation Commission, 2008 en Pereira et al., 2013).

La metodología cualitativas y cuantitativas de Najwer et al., (2016) Valentin R., (2021) y Heurística, presentada para la cuantificación de la geodiversidad en esta investigación, puede ser una herramienta útil para las personas responsables de tomar decisiones sobre el territorio, ya que basado en datos reales servirá para la planificación de próximas áreas de protección o el manejo y disposición de los recursos locales. Teniendo en cuenta este contexto, el presente proyecto estudia la cuantificación de la geodiversidad de la cuenca hidrográfica del rio Palomino, ubicada el bloque tectónico Maracaibo, en el Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), basado en el análisis de múltiples factores abióticos, con miras al manejo integral del patrimonio geológico y fines hacia la

geoconservación, que con avance de la investigación tendrá calibraciones para un mejor ajuste del cálculo de diversidad geológica.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

El continente Sur Americano cuenta con 5 geoparques reconocidos por la UNESCO distribuidos en Brasil, Uruguay, Ecuador, Perú y Chile, un geoparque a últimos pasos de cumplir los parámetros y 35 iniciativas (**Fig.1**). En Colombia existen dos iniciativas de incorporación a la red de Geoparques, el “Proyecto geoparque Cañón del Chicamocha” y el “Proyecto geoparque Complejo Volcánico Glaciar Ruiz-Tolima”. Ambos con metodologías de cuantificación distintas intentan potencializar y proyectar estas áreas de interés por medio de los objetivos de desarrollo sostenible y su conservación como patrimonio geológico.



**Figura 1. a)** Distribución de geoparques, aspiraciones e iniciativas en el continente suramericano. **b)** Parque Nacional Los Nevados. **c)** Parque Nacional Cañón del Chicamocha. (Rosado-González et al. 2008).

Cabe resaltar que el país cuenta con una amplia diversidad geológica, representada por recursos minerales y energéticos, reservorios de agua, cadenas montañosas, cuevas, yacimientos fosilíferos, volcanes, sierras nevadas, aguas termales y cientos de rocas de diferentes composiciones y orígenes, cuyos registros han sido interpretados gracias a la labor de los especialistas en ciencias de la tierra y gracias a ello existen diversas iniciativas de generar conocimiento y divulgación científica a partir de la geodiversidad.

Científicos pioneros en geoconservación y patrimonio geológico, empezaron a definir estos conceptos en cuencas del suroeste Antioqueño (p.e., Cárdenas y Restrepo, 2006; Jaramillo et al. 2013; Molina y Mercado, 2003; Torres-Herrera y Molina-Escobar, 2012). Actualmente el grupo de Geología Ambiental y Tectónica (GAT) de la universidad EAFIT, ha venido consolidando proyectos tendientes a la aplicación de diferentes metodologías para la estimación de la diversidad geológica. Lo anterior ha permitido avanzar en la a generación de inventarios y metodologías heurísticas para fines académicos, culturales, y socio económicos que le brindan valor agregadas a un área de interés.

Adicionalmente, otros autores han desarrollado propuestas de aprovechamiento del patrimonio geológico de Colombia, a través del geoturismo en departamentos como Santander, Cesar, Magdalena, Quindío, Risaralda, Tolima, Cundinamarca, entre otros. (Gelvez-Chaparro et al., 2020); (Ríos-Reyes et al., 2018); (Sánchez-Botello et al., 2018); (Tavera et al., 2017).

## **2.1. Geodiversidad y conceptos a fines**

A lo largo de las décadas se ha intentado de definir el termino de geodiversidad y otorgarle parámetros para su cuantificación, en un área con características especiales, sin embargo, la evaluación de los dominios abióticos es compleja de evaluar tanto cualitativa o cuantitativamente (Gray et al. 2004). Los autores precursores del cálculo de este parámetro (p.e., Christian (1952) y Ollier (1969)), interpretan la geoconservación, a partir de rasgos geológicos y geomorfológicos. Nieto, (2001) definen el término como “el número y variedad de estructuras sedimentarias, tectónicas, materiales geológicos (minerales, rocas, fósiles y suelos)

que constituyen el sustrato de una región, sobre las que se asienta la actividad orgánica, incluida la antrópica”. Entre varias definiciones más se cuenta la de “International Association of Geomorphologists” (2003), que define geodiversidad como: “la variedad de ambientes geológicos y geomorfológicos considerados como la base para la diversidad biológica en la Tierra”, Kozłowski (2004), agrega parámetros climatológicos, hidrológicos superficiales y subterráneos. Posteriormente, Valentin (2021), reúne toda esta información en un modelo de clasificación de parámetros morfométricos, geológicos (rocas, fósiles, estructuras, minerales), climatológicos, hidrológicos y pedológicos para producir un mapa regional de geodiversidad.

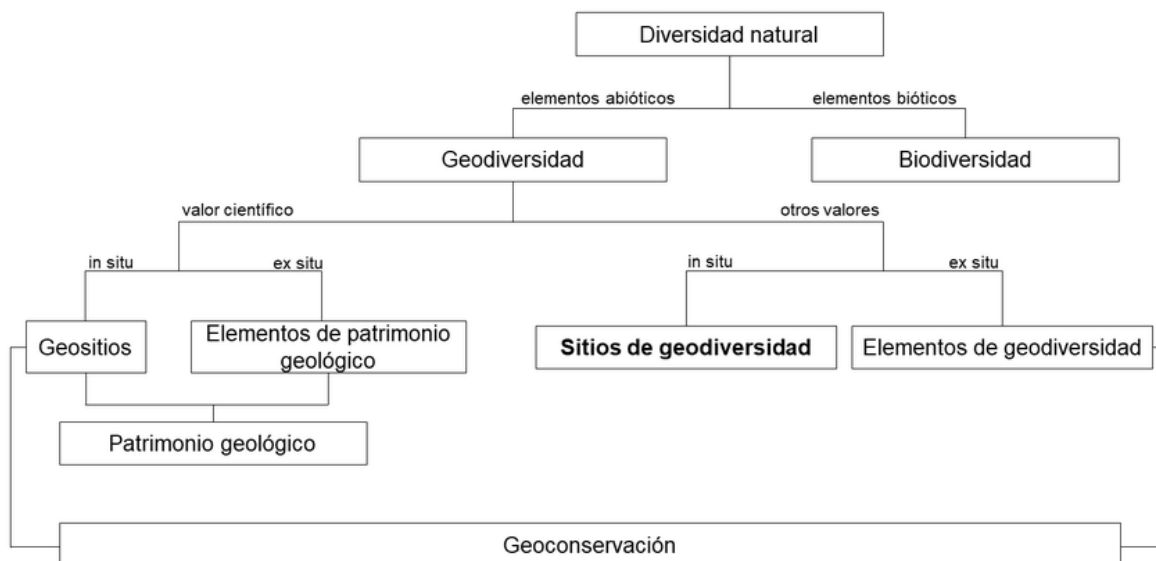
Finalmente, el concepto de geodiversidad adaptado a este trabajo es la de Nieto (2001): *“El número y variedad de elementos geológicos presentes en un lugar: las rocas y sedimentos del sustrato, la geometría y estructura que presentan, su composición y los minerales que las forman, los suelos formados sobre ellas, los fósiles que contienen, las formas del relieve y los procesos que dan lugar a cada uno de ellos. También forman parte de la geodiversidad los recursos naturales de origen geológico, como los yacimientos minerales, recursos energéticos (carbón, petróleo, gas), acuíferos y recursos hídricos”*. Hace necesaria la definición de los siguientes términos:

- ✓ **Patrimonio geológico:** se entiende como “el conjunto de elementos geológicos que destacan por su valor científico, cultural o educativo”. El estudio del patrimonio geológico, no interviene en la definición de las diferentes clases de geodiversidad ni en el análisis de la variedad, frecuencia y distribución de estas, aunque sí interviene en su valoración de la calidad o interés (Carcavilla et al., 2008). El patrimonio geológico hace parte del patrimonio natural, y se conforma de lugares, sitios o bienes de interés geológicos.
  
- ✓ **Geoconservación:** comprendido como el conjunto de acciones, técnicas y medidas utilizadas para promover y asegurar el uso razonable de los

componentes y lugares más valiosos de la geodiversidad, resguardando su integridad para su aprovechamiento futuro. Según el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la geoconservación está encaminada a asegurar la conservación del patrimonio geológico, basándose en su valor intrínseco, vulnerabilidad y riesgo de degradación. En Colombia, por ejemplo, la mayoría de los lugares de alto valor geológico son recursos no renovables, por lo que su destrucción es irreversible, y es por ello que es importante adoptar medidas de conservación del patrimonio geológico.

- ✓ **Geositio:** corresponde a un lugar determinado del territorio, donde está presente uno o más componentes de la geodiversidad, con características destacadas que le otorgan un alto valor en el conocimiento de las Ciencias de la Tierra.
  
- ✓ **Geoturismo:** es una estrategia de promoción de turismo sostenible de un lugar basada en la divulgación de su patrimonio geológico, teniendo en cuenta su relevancia, su valor estético y escénico de diferentes elementos del patrimonio geológico, de forma tal que puedan ser convertidos en recursos turísticos lo suficientemente importantes como para transformarse en uno de los principales atractivos de un determinado entorno.
  
- ✓ **Ecosistema:** “El ecosistema corresponde a comunidades naturales, que, en condiciones no alteradas, están ocupadas por organismos evolucionados adaptados al medio y que, realmente, se sienten en casa dentro de esas condiciones” (Holdridge, 1982).
  
- ✓ **Elementos Abióticos (EA):** Los abióticos son formados por el clima, la composición del suelo, el agua y el clima (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2019).

En el presente estudio, retomaremos el concepto sistémico de geodiversidad en un territorio como la estimación de la variedad, número y distribución de elementos estrictamente de la componente geosférica (componentes abióticos) y su relación con los componentes bióticos (ecosistemas) en un marco de diversidad natural con fines de geoconservación (**Fig 2**).



**Figura 2.** Marco conceptual de la geodiversidad, el patrimonio geológico y la geoconservación, teniendo en cuenta el alcance de la geoconservación. Brilha et al., (2016).

## 2.2 Marco normativo e institucional colombiano

La constitución nacional colombiana reconoce la importancia y la relevancia de la protección del medio ambiente, como un medio eficaz que garantiza la calidad en las condiciones de vida de todas comunidades y las próximas generaciones de la región (Corpocesar, 2009). Para ello, ha tomado el derecho a un medio ambiente sano como un derecho constitucional y le ha otorgado al país la garantía de la protección del medio ambiente y velar por la protección de los activos naturales y ecológicos, así como la responsabilidad de promover el desarrollo sostenible para

conservar las riquezas que necesita el medio ambiente para prolongarse durante los años. (Corpocesar, 2009)

En el año 2018, el presidente de Colombia confirió el numeral 11 del artículo 189 de la Constitución Política y el artículo 60 de la Ley 397 de 1997 modificado por el artículo 30 de la Ley 1185 de 2008, adoptando una serie de regulaciones que permitan garantizar la protección del patrimonio geológico y paleontológico, donde patrimonio geológico hace referencia a la unión de lugares geológicos que presentan valores propios de naturaleza patrimonial (Minenergía, 2018), además de características educativas, culturales y /o científicas, las cuales facilitan el estudio, conocimiento e interpretación de todos los procesos físicos que han tenido influencia en el origen y evolución de la tierra en el pasado, presente y posiblemente en el futuro; y el patrimonio paleontológico al conjunto de restos de organismos que se han conservado en el registro geológico y presentan un valor cultural, científico y/o educativo (Minenergía, 2018).

El Servicio Geológico fue el encargado de desarrollar los parámetros para la elaboración de las directrices sobre la Geoconservación (Carcavilla-Urquí et al., 2015). En el ámbito académico existen propuestas locales, en su mayoría sobre las cordilleras Central y Oriental (Colegial et al., 2002); (Torres y Molina, 2012); (Rendón et al., 2013); (Palacio et al., 2016); (Tavera-Escobar et al., 2017), donde se mencionan los enclaves naturales de Colombia asociados a ciertos valores culturales y sociales que ofrecen información sobre la evolución de la Tierra. Sin embargo, el país aún no está actualizado frente a las metodologías internacionales de conservación, pues la diversidad natural se encuentra únicamente ligada a la concepción de los elementos biológicos o bióticos. El termino geodiversidad o rango natural de características geológicas (Gray, 2013) no ha sido adoptado por las instituciones medio ambientales, tal como lo sugirió la UICN (Unión Internacional para la Conservación Natural), la cual argumenta que la geología es la base y la generadora de los recursos planetarios originales o de primera categoría (Gordon et al., 2017).

La normatividad del SGC, ha adoptado las regulaciones impuestas por el Estado Colombiano, dentro de las cuales se encuentran las siguientes normativas: Ley 163 de 1959, Ley 36 de 1963, Decreto 264 de 1963, Convención para prohibir e impedir la exportación y la transferencia de propiedades ilícitas de bienes culturales, convención sobre la protección del patrimonio mundial cultural y natural, ley 45 de 1983, ley 63 de 1986, constitución política de Colombia 1991- artículos 8, 63 y 72, Convenio de UNIDROIT sobre los bienes culturales robados o exportados ilícitamente, Ley 397 de 1997, Ley 1185 de 2008, Decreto 4131 de 2011, Decreto 2703 de 2013, Plan Estratégico del Conocimiento Geológico del Territorio colombiano 2014-2023, decreto 1080 de 2015, Decreto 1464 de 2016, Ley 1801 de 2016, Convenio de Cooperación 2990-01-2017 y Resolución D-335 del 18 de agosto de 2017 (SGC, 2020).

La siguiente línea del tiempo de la normatividad vigente, demuestra que hasta el momento no se ha trabajado en torno al patrimonio geológico y/o paleontológico, en un área única como lo es del PNN SNSM. Se resume a continuación (RUNAP, 2018):

- ✓ **Resolución 191 de 31 de agosto de 1964.** La cual se reservan y se declaran Parques Nacionales Naturales, tres sectores de tierras baldías en el Departamento del Magdalena.
- ✓ **Resolución 230 de 19 de agosto de 1971.** La cual se aprueba un acuerdo de la Junta Directiva del Instituto de Desarrollo de los Recursos Naturales Renovables INDERENA el cual se delimita el área del Parque Nacional Natural Sierra Nevada.
- ✓ **Acuerdo 025 de mayo 2 de 1977.** La cual se modifican los límites del Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta en los Departamentos de Magdalena, Guajira y Cesar.
- ✓ **Resolución 164 de junio 6 de 1977.** La cual se aprueba el acuerdo 0025 del 02 de mayo de 1977, originario de la Junta Directiva del Instituto de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente – INDERENA.

- ✓ **Resolución 0621 del 09 de julio del 2002.** La cual se establecen lineamientos que deben incorporarse a los procesos de planificación y gestión ambiental de la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR), la Corporación Autónoma Regional de la Guajira (CORPOGUAJIRA) y la Corporación Regional del Magdalena (CORPOMAG) en la Sierra Nevada de Santa Marta
- ✓ **Resolución 0001 del 22 de abril del 2005.** La cual se declara de manera conjunta en ordenación la cuenca hidrográfica del río Guatapurí y se establecen otras disposiciones.
- ✓ **Resolución No. 085 del 8 de marzo del 2007.** La cual se adopta el plan de Manejo del Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta.

### **2.3 Geodiversidad y objetivos de desarrollo sostenible**

La geodiversidad es un parámetro importante para valorizar y difundir los conocimientos sobre la historia de la tierra, en un área con características geológicas especiales (UNESCO,2015). Esta iniciativa de coordinar esfuerzos nacionales e internacionales tiene un fin en común y es preservación, el desarrollo de la sostenibilidad local, el avance de las investigaciones en instituciones de las ciencias geológicas, para el desarrollo y la divulgación del patrimonio geológico, (Rosado-González et al. 2008). Esto ha convocado a la comunidad científica a preparar marcos con futuras actividades de preservación y a partir de esto nace el programa de una “red mundial de parques geológicos”, donde favorece y potencializa las regiones, las comunidades, y el habita de las especies de fauna y flora que habitan en él, mediante los objetivos de desarrollo sostenible. **(Fig.3)**, bajo el auspicio de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).



**Figura 3.** Sección esquemática del desarrollo de los objetivos de desarrollo sostenible en geoparques de América Latina (Rosado-González et al. 2008).

Las áreas con características geológicas especiales las están siendo consideradas valor universal, declarado así en la convención del patrimonio mundial (UNESCO, 2010), dicha iniciativa responde la necesidad de crear geoparques, permitiendo que las naciones se apoyen de un marco internacional para la conservación, el aumento del valor patrimonial del paisaje y preservación los procesos geológicos endógenos, y exógenos. Unesco posee criterios evaluativos para clasificar y declarar áreas de interés geológico como patrimonio (UNESCO, 2010):

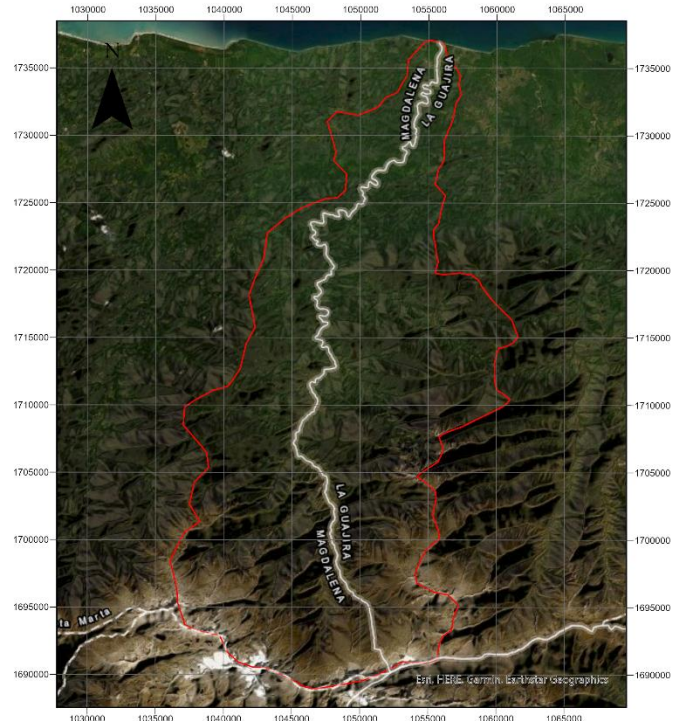
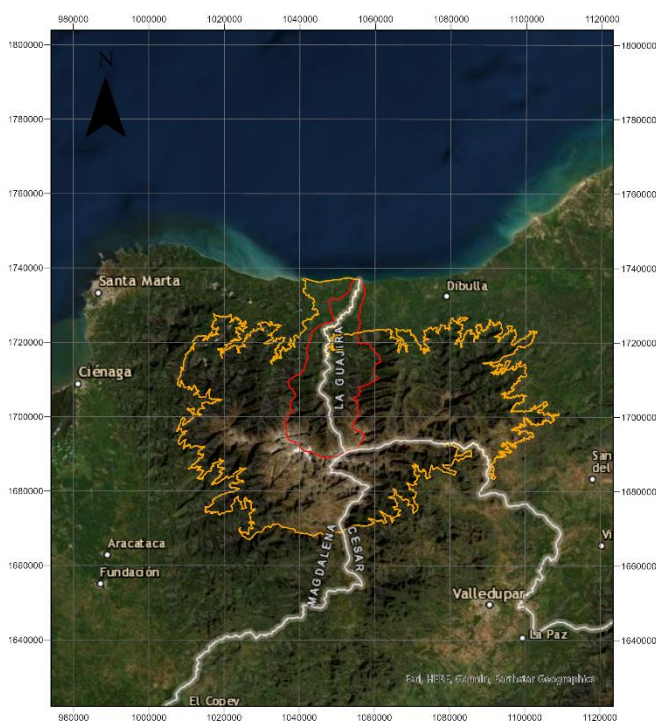
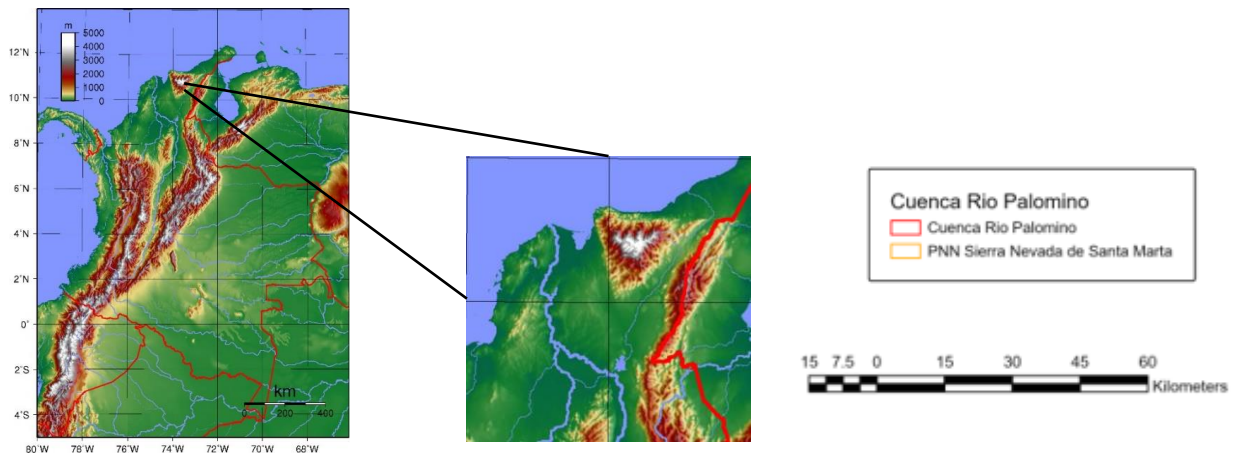
- ✓ **Tamaño y entorno:** El área de interés debe contener los límites claramente definidos y debe ser lo suficientemente extensa para generar aportes considerables tanto económicos como culturales; debe incluir además sitios de importancia ecológica, arqueológica, histórica, cultural y geológica nacional, regional y/o internacional que sirvan de apoyo para estudiar y entender los procesos que formaron la zona.

- ✓ **Gestión y participación local:** La zona de interés debe contar con fácil acceso y estar protegida por un organismo o asociación de gestión responsable y transparente que demuestre un fuerte apoyo a la comunidad y participación local, las cuales se comprometan a implementar el plan de gestión. Adicional a lo anterior se debe buscar el asesoramiento de la secretaria de Geoparques de la UNESCO, la cual debe informar paralela y sistemáticamente a las embajadas y/o delegaciones responsables ante la UNESCO de las solicitudes de Geoparques nacionales para asistencia de la UNESCO.
- ✓ **Desarrollo económico:** La zona de interés debe contar con los recursos tales que, permitan suplir las necesidades de la generación actual, sin afectar la futura. Los geoparques buscan estimular la actividad económica y el desarrollo sostenible de la región, así como mejorar las condiciones de vida humana, del medio rural y urbano, a su vez fortalecer la identidad de la población con su territorio y estimular la protección del patrimonio geológico.
- ✓ **Educación:** El geoparque debe proporcionar las herramientas, metodologías u actividades que permitan la divulgación del conocimiento geocientífico y ambiental a las poblaciones visitantes.
- ✓ **Protección y conservación:** Se debe garantizar la protección por parte de las autoridades delegadas del cuidado del geoparque.
- ✓ **Red mundial de conocimiento geocientífico:** Se debe generar una cooperación e intercambio de material de patrimonio geológico entre expertos y profesionales alrededor del mundo.

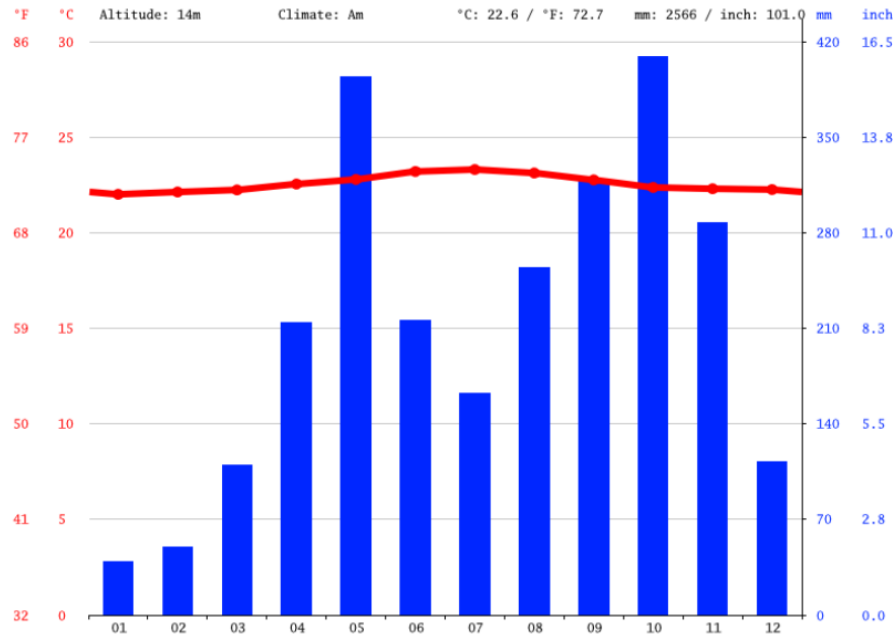
### 3. CARACTERIZACION GEOESFERICA DEL AREA DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolla en La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), declarada por la UNESCO como Reserva del Hombre y la Biósfera, está ubicada en la región Caribe de Colombia (**Fig 4**), donde ocurre uno de los fenómenos más particulares del planeta, siendo el macizo montañoso costero más alto del planeta, que se eleva 5770 metros sobre el nivel del mar (Castaño, 1991), esta aérea protegida limita con los departamentos del Magdalena, Guajira y Cesar.

El área de estudio hace énfasis en la cuenca hidrográfica del río Palomino, que se ubica en la zona norte del parque nacional natural, entre el departamento del Magdalena y la Guajira, siendo este la división entre estos dos departamentos (**Fig 4**). Esta cuenca nace en una altura aproximada de 5600 metros sobre el nivel de mar, su morfología es ovalada a rectangular, de tipo exorreica, es decir, una cuenca abierta que desemboca en el mar que ocupa un área de  $68,4 \text{ km}^2$ , su cauce principal alcanza unos 70 km de longitud y desemboca en el mar Caribe. La precipitación en el área de estudio es bimodal, con un periodo lluvioso entre los meses de mayo a noviembre y los periodos de menos pluviosidad entre diciembre y abril, posee un clima cálido promedio es de 20 a 27°C (**Fig.5**). (Dechner & Diazgranados, 2007)



**Figura 4.** Ubicación de PNN SNSM (polígono naranja) y Cuenca hidrográfica río Palomino (polígono rojo).



**Figura 5.** Climograma cuenca río Palomino. Tomado y modificado de Climate Data.ORG

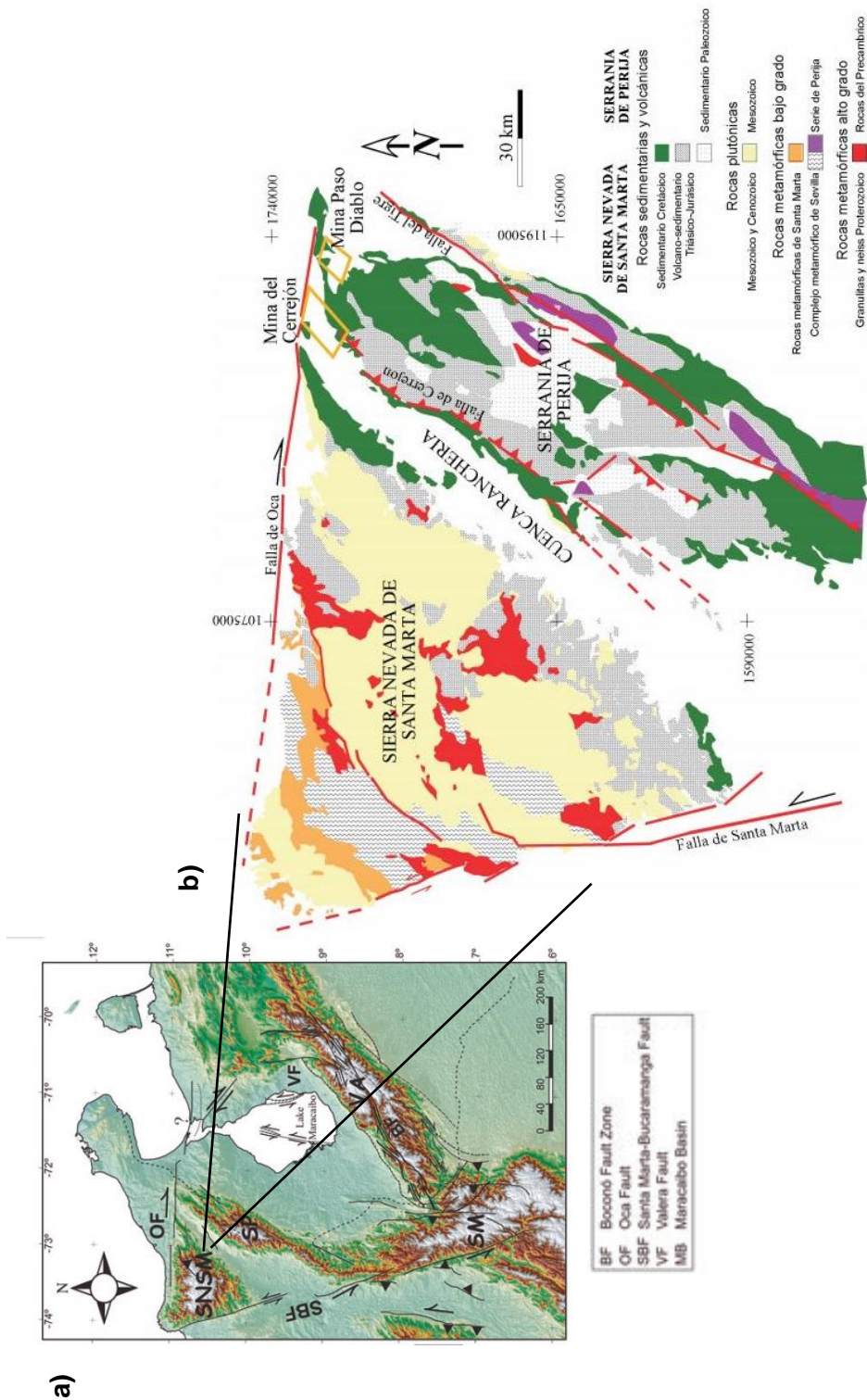
### 3.1 Geodinámica del bloque Maracaibo

La unidad fisiográfica SNSM, se encuentra ubicada en el contexto geodinámico del bloque tectónico de Maracaibo (MOF) “Maracaibo orogenic float” junto a las unidades fisiográficas Cuenca Cesar-Ranchería, Serranía del Perijá, Macizo de Santander, Cuenca Catatumbo, Cuenca Maracaibo y Serranía de Mérida” (**Fig 6 y 7**) (Cediel F. e., 2019).

El bloque Maracaibo se ha interpretado, como un segmento interrumpido del Escudo Guayanés cubierto por grandes secuencias supra-continetales del Fanerozoico, sobre el cual en el Cretácico superior, el bloque migró a lo largo del sistema de fallas Santa Marta-Bucaramanga y Oca-El Pilar, generándose así la elevación de la SNSM, todo esto como resultado de la interacción entre las placas Nazca, Caribe y

América del Sur (**Fig 6 y 7**) (Cediel F. e., 2019). Está limitado al NE-SW por la Falla de Santa Marta– Bucaramanga, interpretada como una falla de desgarre de componente sinistral, y presenta una longitud aproximada de 580 km (Kellogg, 1982); al Norte lo limita la Falla de Oca, la cual presenta una extensión aproximada de 300 km, extendiéndose desde el extremo noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, donde se cruza con la Falla SM-Bucaramanga hasta su intersección con la Falla Boconó en Venezuela, descrita como una falla de desgarre de componente dextral con dirección E-W (Hernández, 2003). Finalmente, la falla de Boconó presenta una extensión aproximada de 500 km, considerada a su vez como una falla de desgarre de componente dextral con orientación SO-NE, esta es descrita como uno de los rasgos neotectónicos más importantes de la parte noroccidental de América del Sur, la cual junto con la falla de Oca-Ancón, San Sebastián y El Pilar, forman una parte importante del eje sismogénico hacia el norte y al oeste de Venezuela (Soulas, 1986).

Dentro de la dinámica regional, el bloque Maracaibo es de gran importancia geológica ya que presenta un basamento granulítico Precámbrico, cinturones metamórficos del Paleozoico y Cenozoico y estar en su mayor parte afectado por plutones del arco Jurásico al Cenozoico, a su vez un importante episodio de sedimentación Cretácica (Cediel, Shaw, & Cáceres, 2003), las cuales contienen secuencias sedimentarias hidrocarburíferas en las cuencas Maracaibo, Cesar-Ranchería y Catatumbo (Ujueta & Llinas, 1990). Tres provincias geológicas se han identificado, formadas de Este a Occidente, conformadas por cinturones metamórficos con tendencia Noroseste de edades del Precámbrico, Paleozoico y Cretácico, intuidos por magmático del Pérmico, Jurásico y Eoceno metamórficas separadas por fallas regionales (p.e., Falla Cerrejón, Sevilla) (**Fig.6 y 7**) (Tschanz et al. 1974; Bustamante et al. 2009)



**Figura 6. a) Características tectónicas del bloque Maracaibo (Colmenares et al., 2003) b) Mapa generalizado de la Sierra Nevada de Santa Marta y Serranía de Perijá diferenciando unidades pre-Cenozoicas por su edad y composición, y estructuras mayores (Bayona et al., 2007)**

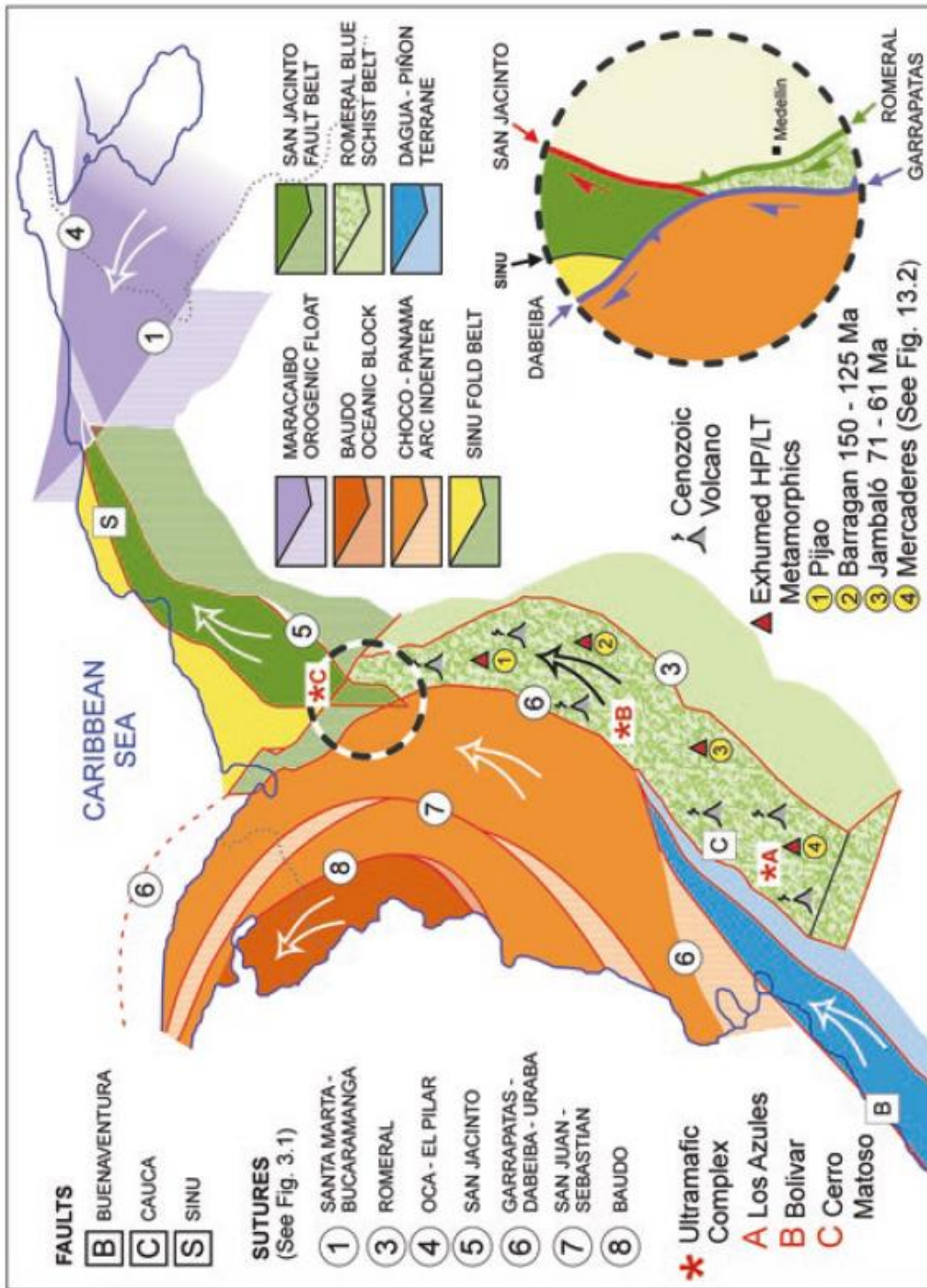


Figura 7. Bloque diagrama donde ilustra la interacción de las suturas en el margen norte de Colombia (Cediel F. 2019)

### **3.2 Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta**

La Sierra Nevada de Santa Marta se encuentra ubicada al norte colombiano en las coordenadas 10°52'00"N y 73°43'12"W, en los departamentos de Guajira, Magdalena y Cesar, este orógeno es considerado el macizo litoral más grande del mundo, contando con filos y escarpes pronunciados que le dan su forma característica de pirámide casi perfecta, además, de contar con grandes riquezas en flora y fauna, siendo el hogar y resguardo de cuatro pueblos indígenas, los cuales superan las cifras de 30.000 pobladores y dentro de los cuales están: Los Kogui, los Arhuaco, los Wiwa y los Kankuamos (IDEAM, s.f.).

El Atlas Geológico Colombiano, describe que los picos de la SNSM son: el Simón Bolívar, Colon, Codazzi y Guardian; donde los picos más altos son Simón Bolívar y Colon y alcanzan alturas aproximadas de 5.775 msnm; estas zonas glaciares presentan una influencia directa de la elevación del orógeno y están ubicadas en el flanco sur donde hay mayor concentración de nieve y formación de hielo. Los últimos años han estado marcados por el retroceso glaciar producto del deshielo, lo cual a su vez produce geoformas características como morrenas y lagunas en la cima del orógeno. Para 1850, la SNSM presentaba 82.6 km<sup>2</sup> de área glaciar, mientras que para el 2019 había presentaba solamente 6.21 km<sup>2</sup> de área glaciar; en resumen, la mayor pérdida de área glaciar está registrada entre los años 1850 y 1939 y fue de aproximadamente 60,9 km<sup>2</sup>. (Viloria de la hoz, 2005).

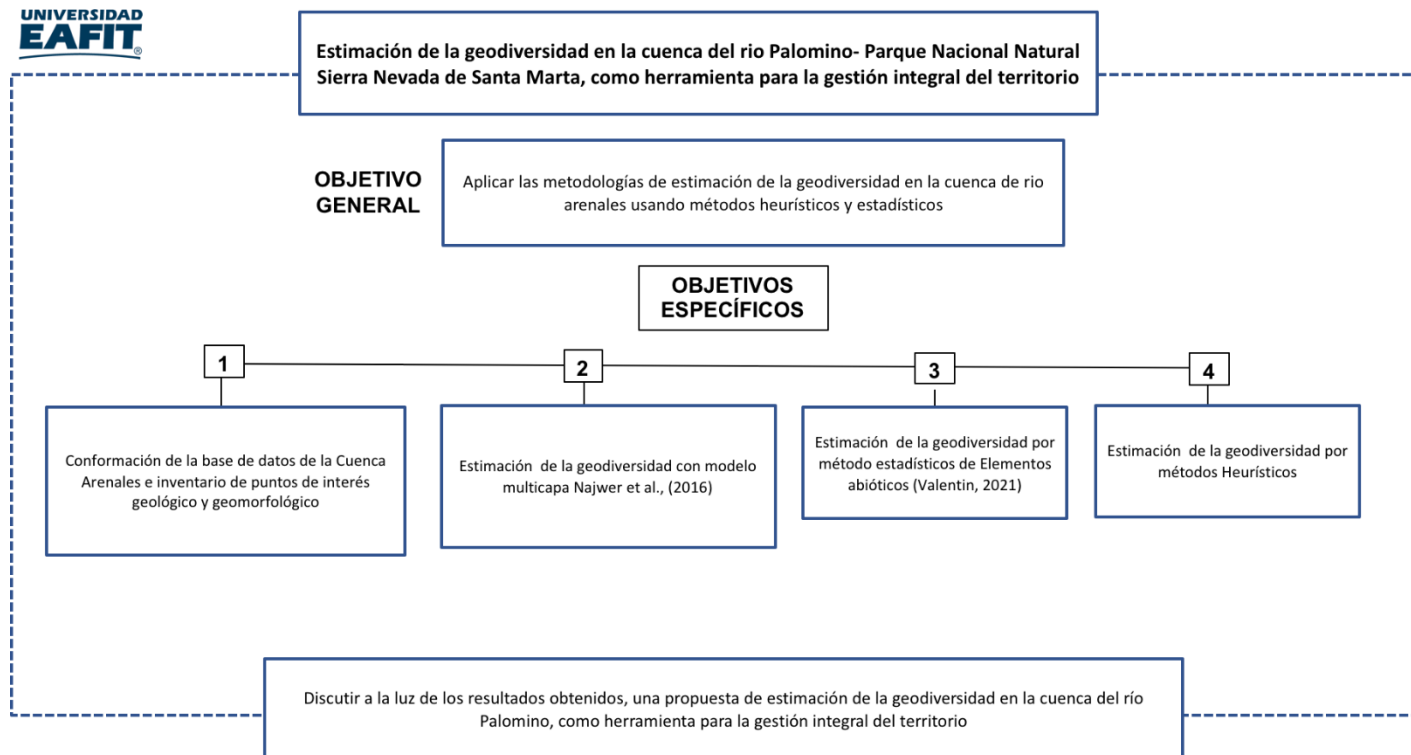
La SNSM presenta gran diversidad climática, debido a su variedad de pisos térmicos producto de su posición geográfica permite contener una gran variedad de macroclimas, formando así múltiples microclimas como zonas de bosque muy seco tropical a zonas glaciares. En las zonas las bajas del orógeno los suelos tienen sus usos principales en ganadería, turismo y agricultura (Colmenares, y otros, 2007). Gracias a las características geográficas, climáticas y geomorfológicas la SNSM es hogar de diferentes especies como plantas, briofitos, peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos, y representan el 12.4% del porcentaje de los animales de Colombia; además, con base a esto la zona fue declarada como área de endemismo de aves (EBA), sin embargo, en general, todas las especies de la Sierra se encuentran en

amenaza debido a la destrucción de su hábitat (Parques Nacionales Naturales-MinAmbiente, 2005).

Cabe resaltar que el área también posee recursos económicos en ella están: caliza, mármol, talco, tremolita, mica, plagioclasa, moscovita, hierro, titanio, magnetita, cobre, oro, magnesio, recursos hídricos, sal, carbón, bauxita, gravas, arenas, barita y fosfatos (Colmenares et al., 2007). El presente trabajo, se centra en la valoración de la geodiversidad en la cuenca del río Palomino, con el fin último de aportar a la gestión ambiental integral en áreas nacionales protegidas. El marco científico se discute a continuación.

#### **4. MARCO CIENTIFICO**

Este trabajo de grado se realizó con el fin de dar una respuesta a las necesidades de la gestión integral del patrimonio geológico en la Sierra Nevada (SNSM), tomando como caso de estudio la cuenca del río Palomino (CP). De esta manera se engloba en el macroproyecto: “Cuantificación de la diversidad geológica del Sierra Nevada de Santa Marta” consolidando el proceso de gestión integral del patrimonio geológico liderado por María Isabel Marín-Cerón, al interior del grupo de investigación en Geología Ambiental y Tectónica, semillero de Geología Regional y Geoquímica, en su línea de profundización en Geoconservación. El flujograma metodológico se describe en la siguiente figura (**Fig. 8**), el cual se construyó a partir de la siguiente hipótesis: La estimación de la geodiversidad por métodos heurísticos y estadísticos son comparables y validables en términos de la gestión integrada del patrimonio geológico con fines de geoconservación.



**Figura 8.** *Flujograma metodológico para la cuantificación de geodiversidad en la cuenca del río Palomino.*

#### **4.1 Conformación de la base de datos e inventario de Lugares de Interés**

En esta etapa de la investigación se desarrolló la línea de cartografía y de mapas base. Para los parámetros morfométricos, se realizaron los mapas temáticos para la identificación de la heterogeneidad física, morfometría y variación topográfica de la cuenca del río Palomino, a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) con tamaño de celda de 100 metros. Se implementó el sistema de información geográfica (ArcGIS 10.8 y ArcGIS Pro), con proyección geográfica MAGNA\_Colombia\_Bogota para el procesamiento de la información cartográfica en escala 1:200.000 de la zona, insumos proporcionados por la cartografía geológica y geomorfológica de las planchas 12 y 19 del Servicio Geológico Colombiano (2007), incluyendo sus memorias explicativas, estudios detallados realizados por las corporaciones autónomas como Corpomagdalena (2009), Corpocesar (2019), información del registro único nacional de áreas protegidas (RUNAP, 2018), y

estudios regionales del bloque Maracaibo por (Colmenares, 2018). **(Fig. 9)**. El inventario de lugares de Interés Geológico-Geológico y geomorfológico (LIG's), se realizó a partir de la revisión de información secundaria y documentación bibliográfica. Las características físicas mencionadas anteriormente permitieron orientar una base datos con características específicas de manera ordenada y minuciosamente clasificada, por los tres métodos empleados para la cuantificación, cada método lo conforma una geodatabase, con las capas de entrada a utilizar para la cartografía de geodiversidad separados en: "*Metodología\_Najwer*", "*Metodología\_Valentin*", "*Metodología\_Heuristica*". Dicha información fue obtenida mediante artículos científicos, empresas públicas y privadas del país, publicaciones locales de turismo, entre otros. **(Fig. 8)**

La cuantificación de la geodiversidad en la cuenca hidrográfica del río Palomino, se basó en el modelo cuantitativo de Valentin, (2021), desarrollados mediante el software ArcGIS 10.8, utilizando sistema de coordenadas nacional Marga Colombia Bogotá, se emplearon varias variables que se reconocen como subíndices de diversidad abiótica para la cuantificación del índice de geodiversidad:

- |                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| ✓ Diversidad geológica      | ✓ Diversidad climática   |
| ✓ Diversidad geomorfológica | ✓ Diversidad hidrológica |
| ✓ Diversidad estructural    | ✓ Diversidad Pedológica  |

Respecto a método cualitativo se realizó mediante el modelo multicapa propuestos por Najwer et al., (2016) y la creación de un inventario que se soporta con la interpretación de mapas, geomorfológicos, topográficos, publicaciones existentes, fotografías aéreas y satelitales, con una fuerte relación con el factor biótico. Estos 3 métodos son comparados y complementados **(Tabla 1)** para obtener un análisis con datos reales y sensibles de geodiversidad gracias al criterio del experto.

**Tabla 1. Características distintivas para los métodos cuantitativos-cualitativos Najwer et al., (2016), Valentin (2021) y Metodología Heurística**

<b>Najwer et al., (2016)</b>	<b>Valentin (2021)</b>	<b>Metodología Heurística</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Agrupa 3 capas de entrada               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Geológica</li> <li>○ Morfométrica</li> <li>○ Bioclimática</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Agrupa 6 capas de entrada               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Geológica</li> <li>○ Geomorfológica</li> <li>○ Estructural</li> <li>○ Climática</li> <li>○ Hidrológica</li> <li>○ Pedológica</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Agrupa 6 capas de entrada               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Relieve relativo</li> <li>○ Geomorfológica</li> <li>○ Geológica</li> <li>○ Climática</li> <li>○ Hidrológica</li> <li>○ Ecosistémica</li> </ul> </li> <li>✓ Mapa de inventario geositios</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Herramienta software ArcGIS 10.8 “natural breaks”</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Herramienta software ArcGIS 10.8 “Geodiversidad”</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Herramienta software ArcGIS 10.8 “natural breaks”</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cada variable se le asigna un peso específico en porcentaje y su sumatoria será el 100%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sumatoria de los 6 subíndices, esa suma representa los cuadrantes de cada variable debido a que todas se consideran de igual importancia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cada variable se le asigna un peso específico en porcentaje y su sumatoria será el 100%</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Valores de índice de geodiversidad de 1 (muy baja) a 5 (muy alta)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rango de factores abióticos, es decir, la cantidad mínima y máxima de subíndices ocupando el área de la cuenca de estudio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Valores de índice de geodiversidad de 1 (muy baja) a 5 (muy alta)</li> </ul>

#### **4.2 Estimación de la geodiversidad con el Modelo multicapa. (Najwer et al., 2016)**

Usando la herramienta de “natural breaks”; en ArcGIS, en la cual consiste en agrupar los datos para determinar la mejor disposición de valor de diferentes clases, el cual se adapta, para las necesidades y datos disponibles en el área, usando 3 capas de entrada geológica, morfométrica y bioclimática, compuestas por clases, se agrupan asignado un valor según su importancia, asignado por un grupo de expertos en una escala de 1 a 5; muy baja, baja, media, alta y muy alta

Metodológicamente se definieron las siguientes etapas: (1) conformación de base de datos e inventario de Lugares de Interés geológico/geomorfológico. (2) Valoración geomorfométrica; (3) Valoración Bioclimática y (4) Valoración de la Geodiversidad.

#### **4.2.1 Valoración geomorfológica**

La valoración de la diversidad geomorfológica: Se obtienen los valores para la clasificación morfométrica de la cuenca, a partir de la reclasificación de pendientes y del relieve relativo. Para la construcción de la capa geomorfométrica se usa la herramienta “Weighed Overlay”, se usa como datos de entrada pendientes y el relieve relativo reclasificados, el resultado se usa como entrada en la herramienta “reclassify”, obteniendo así el mapa de Geomorfométrico el cual está clasificado de 1 a 5 en función de su altura siendo 5 lo más alto y 1 lo más bajo.

##### **✓ Relieve relativo**

La construcción de relieve relativo se usó como base el DEM de la zona de estudio, este modelo de elevación digital se le realiza una corrección topográfica, para generar un “Fishnet” usando la herramienta “Create Fishnet”, en forma de polígono, con dimensiones de 100x100 metros, con el uso de la herramienta “Add Surface information”, disponible en la caja de herramientas “3D analyst Tools”, se le agregan a la “Fishnet” los valores de altura máxima y mínima en la tabla de atributos. Luego se agrega un nuevo campo a la tabla de atributos correspondiente al relieve relativo, este valor se calcula a partir de la diferencia de los valores máximos con los mínimo, este “feature” es convertido a puntos usando la herramienta “feature to point”, estos puntos se les aplica una interpolación de tipo IDW, este proceso tiene como resultado el ráster de relieve relativo, se reclasifica con la herramienta “reclassify” se usando el método de “natural breaks” generando la capa de relieve relativo clasificada en 5 clases.

##### **✓ Pendientes**

La valoración de las pendientes en función de la geodiversidad, se generó la capa de pendientes en grados a partir del DEM, con la herramienta “slope”, se procede a

la reclasificación, usando la herramienta “reclassify” y el método “natural breaks” dando como resultado las pendientes clasificadas en 5 clases.

#### **4.2.2 Valoración bioclimática**

La clasificación bioclimática se utilizó como base la clasificación de ecosistemas escala 1:100000, (con información levantada en 1:30000) del Instituto de Investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt, a estos se les asigna un valor en escala 1 a 5, clasificando así la importancia de los ecosistemas presentes en la cuenca, este valor se añade a la tabla de atributos como el nuevo campo con ayuda de la herramienta ‘Feature to Raster’ se convierten en un ráster reclasificado según la escala otorgada para obtener el mapa de diversidad de ecosistemas.

#### **4.2.3 Valoración geológica**

Tomando como base el mapa geológico del servicio geológico colombiano, escala 1:100000, del cual se extraen las unidades litológicas presentes en la cuenca, se les otorga un valor en escala de 1 a 5, según la importancia y relevancia de cada unidad para definir la historia geológica general de la cuenca, luego con el uso de la herramienta ‘Feature to Raster’ se convierte esta capa en un raster reclasificado según la escala otorgada para obtener el mapa geológico de la cuenca.

#### **4.2.4 Valoración de geodiversidad**

El cálculo de la geodiversidad se emplea la herramienta “Weighted Overlay”, donde a cada variable se le asignó un peso específico, para el factor bioclimático se le otorgo un peso de 30, esto debido a la alta diversidad de fauna, flora en distintos pisos climáticos de la zona de estudio, para la geología un peso de 35, debido a que, si bien hay una amplia representación de edades, y para la morfometría un peso de 35, debido a la gran variedad de unidades geomorfológicas en la zona.

**Tabla 2.** *Valores de clasificación de las variables, según el parámetro y el valor de geodiversidad, para la metodología de Najwer et al., (2016)*

Cuenca	Entrada	Método de clasificación	Parámetro	Valor Geodiversidad	Reclasificación	Pesos
Río Palomino	Relieve Relativo	Cuantitativo, Clasificación Natural Breaks	Valores de 0-288.284	1	Muy Bajo	10
				2	Bajo	
				3	Medio	
				4	Alto	
				5	Muy alto	
	Pendientes	Cuantitativo, Clasificación Natural Breaks	Valores de <3 a 100%	1	Muy Bajo	10
				2	Bajo	
				3	Medio	
				4	Alto	
				5	Muy alto	
	Geomorfología	Cuantitativo Natural Breaks	Espolón facetado de longitud larga, moderada y corta, cerro residual, Escarpe de erosión mayor, montículo denudacional,	1	Muy Bajo	27
			Sierra denudada, Escarpe facetado, Escarpe erosión mayor, sierra glaciada	2	Bajo	
			Lomo denudado, Lomo remanente disectado	3	Medio	
			Colina remante, Barra puntual, Barra longitudinal, Lomo de falla, Morrenas, Circo glacial, Masa glaciario, Marismas	4	Alto	
			Cauce aluvial, Terraza de acumulación, Terrazas de erosión, Playas, Terrazas Costeras, laguna glaciario,	5	Muy alto	
	Geología	Cualitativo, clasificación por el experto	Gneis de los muchachitos, Granulitas de los magos, Cuarzomonzonita de Palomino	3	Medio	25
			Batolito central, Santa Marta, Bolivar, Formación Guatapuri	4	Alto	
			Depósitos glaciares y cuaternarios	5	Muy alto	
	Clima	Cuantitativo y cuantitativo, Clasificación Natural Breaks	Frio super húmedo, Semihumedo, Humedo	3	Medio	15
			Extremadamente frio super humedo, Templado super húmedo, Nival superhumedo	4	Alto	

			Calido Semihumedo, Templado Húmedo, Semihumedo	5	Muy alto	
--	--	--	--	---	----------	--

### 4.3 Modelo de densidad de elementos abióticos. (Valentin, 2021)

Esta nueva metodología contempla la división del territorio mediante una cuadrícula cuyo tamaño será a elección del investigador, proponiendo un tamaño de 1 Km<sup>2</sup> para cartografía temática escala 1:25000, donde se tomarán en cuenta 6 variables abióticas para realizar el cálculo del índice de geodiversidad (**Fig 8**). Para cada variable se define un subíndice de diversidad (Valentín, 2021).

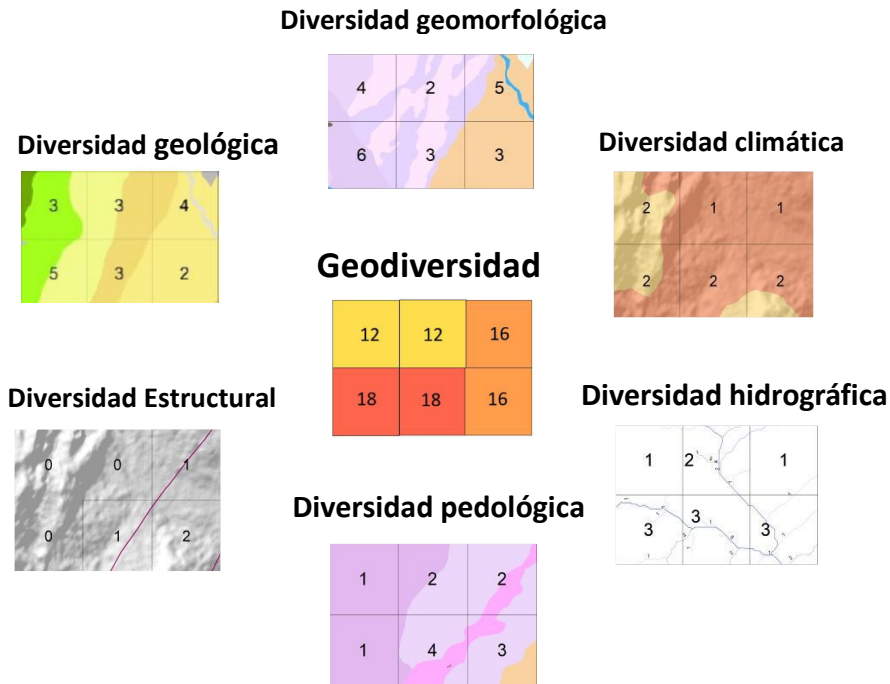
Una vez están definidas las variables a considerar en el cálculo del índice de geodiversidad, siguiendo los pasos descritos a continuación, es necesario manejar los mapas temáticos a la misma escala. Si alguna de las variables presenta una escala de trabajo menor, automáticamente las demás variables y el índice de geodiversidad toman la menor escala de trabajo considerada. La definición de la escala de trabajo es elección del investigador, y se debe basar en la escala disponible de todos los mapas temáticos, y el tamaño de la zona de estudio. Se recomienda que todos los mapas temáticos se encuentren a la misma escala, con el fin de evitar sobre o subestimaciones de cualquier parámetro

- ✓ **Diversidad geológica:** El subíndice de diversidad geológica se tomó de Pereira et al. (2013) definido como el número de unidades litológicas representadas en el mapa geológico. Esta definición se complementa definiendo la diversidad geológica como el número de unidades litológicas representadas en el mapa geológico por unidad de área
- ✓ **Diversidad geomorfológica:** Al igual que el subíndice de diversidad geológica, el subíndice de diversidad geomorfológica se tomó de Pereira et al. (2013), manteniendo únicamente la definición del subíndice de diversidad de relieve. Corresponde entonces al número de unidades geomorfológicas (o subunidades dependiendo la metodología de clasificación geomorfológica) presentes en el territorio por unidad de área. A diferencia de Pereira et al.

(2013), en esta metodología se separan los subíndices de diversidad geomorfológica y diversidad hidrográfica, realizando un cálculo específico para cada uno de ellos, tomándolos como variables únicas e independientes.

- ✓ **Diversidad estructural:** Este subíndice de contactos estructurales es el resultado del conteo de los contactos entre unidades morfoestructurales, recalcando la importancia de la geomorfología para ellos. Sin embargo, esta investigación propone un subíndice de diversidad de geología estructural, definido como el número de fallas por unidad de área en la zona de estudio. Esta propuesta da valor a la geología estructural al igual que Forte (2014), en el cálculo del índice de geodiversidad, y así mismo al no integrar las morfoestructuras, se evita realizar una sobreestimación de la geomorfología al momento de calcular el índice de geodiversidad
  
- ✓ **Diversidad climática:** El subíndice de diversidad climática se tomó como lo planteó Argyriou et al. (2016), generando zonas climáticas a partir del análisis de la temperatura y precipitación medias mensuales, usando la metodología propuesta por Kottek et al (2006), sin embargo, cualquier metodología puede ser usada, siempre teniendo en consideración que se deben usar las mismas metodologías en diferentes áreas si se desea compararlas entre sí. Estas zonas climáticas se contabilizan generando una cantidad de elementos abióticos por unidad de área
  
- ✓ **Diversidad hidrográfica:** Este índice se tomó del planteado por Pereira et al. (2013) como subíndice de diversidad hidrográfica, el cual se calcula dividiendo el mayor orden o jerarquía de los cauces presentes en cada unidad de área, entre dos, y aproximándolo al mayor entero más cercano en caso de que sea un número decimal

- ✓ **Diversidad pedológica:** El subíndice de diversidad pedológica se toma de J. P. Silva et al. (2013). El cálculo de este índice se realice mediante el conteo de las unidades pedológicas obtenidas del mapa de suelos, por unidad de área.



**Figura 11.** Cálculo de Geodiversidad. Tomado y modificado de Valentin, (2021)

#### 4.4 Método heurístico

Para el método heurísticos se usaron los mapas temáticos: geología, hidrología, clima, geomorfología, estructuras, y ecosistémico, donde cada componente de cada factor recibió una calificación de importancia de 1 a 5 siendo 1 el muy bajo y 5 muy alto (**Tabla 4**). Cabe mencionar que las fuentes hídricas principales, las geoformas cercanas a ella, los lineamientos estructurales principales y las unidades cercanas a ella tuvieron un mayor peso que el resto de los elementos, por su importancia en la formación del paisaje.

**Tabla 3.** Valores de clasificación de las variables, según el parámetro y el valor de geodiversidad, para la metodología heurística.

Cuenca	Entrada	Parámetro	VG	Reclasificación	Pesos
Río Palomino	Relieve Relativo	Valores de 0-288.284	1	Muy Bajo	10
			2	Bajo	
			3	Medio	
			4	Alto	
			5	Muy alto	
	Geomorfología	Espolón facetado de longitud larga, moderada y corta, cerro residual, Escarpe de erosión mayor, montículo denudacional,	1	Muy Bajo	27
		Sierra denudada, Escarpe facetado, Escarpe erosión mayor, sierra glaciada	2	Bajo	
		Lomo denudado, Lomo remanente disectado	3	Medio	
		Colina remante, Barra puntual, Barra longitudinal, Lomo de falla, Morrenas, Circo glacial, Masa glaciaria, Marismas	4	Alto	
		Cauce aluvial, Terraza de acumulación, Terrazas de erosión, Playas, Terrazas Costeras, laguna glaciaria,	5	Muy alto	
	Geología	Gneis de los muchachitos, Granulitas de los magos, Cuarzomonzonita de Palomino	3	Medio	25
		Batolito central, Santa Marta, Bolívar, Formación Guatapurí	4	Alto	
		Depósitos glaciares y cuaternarios	5	Muy alto	
	Clima	Frio super húmedo, Semihúmedo, Húmedo	3	Medio	15
		Extremadamente frio super húmedo, Templado super húmedo, Nival superhúmedo.	4	Alto	
		Cálido Semihúmedo, Templado Húmedo, Semihúmedo.	5	Muy alto	
	Ecosistemas	Agroecosistemas, Bosques fragmentados.	1	Muy Bajo	13

		Arbustal andino húmedo, vegetación secundaria.	2	Bajo	
		Bosque andino húmedo. Subandino húmedo.	3	Medio	
		Paramo	4	Alto	
		Sistemas asociados a ríos, Glaciares y Nivales.	5	Muy alto	
	Hidrología	Orden de drenaje 1	1	Muy Bajo	20
		orden de drenaje 2	2	Bajo	
		Orden de drenaje 3	3	Medio	
		Orden de drenaje 4	4	Alto	
		Orden de drenaje 5	5	Muy alto	

## 5. RESULTADOS

Con el fin de entender la geodiversidad de la cuenca del río Palomino, se va a reconstruir la evolución geológica asociada a las litologías que afloran en la cuenca, a partir de recolección bibliográfica reportada.

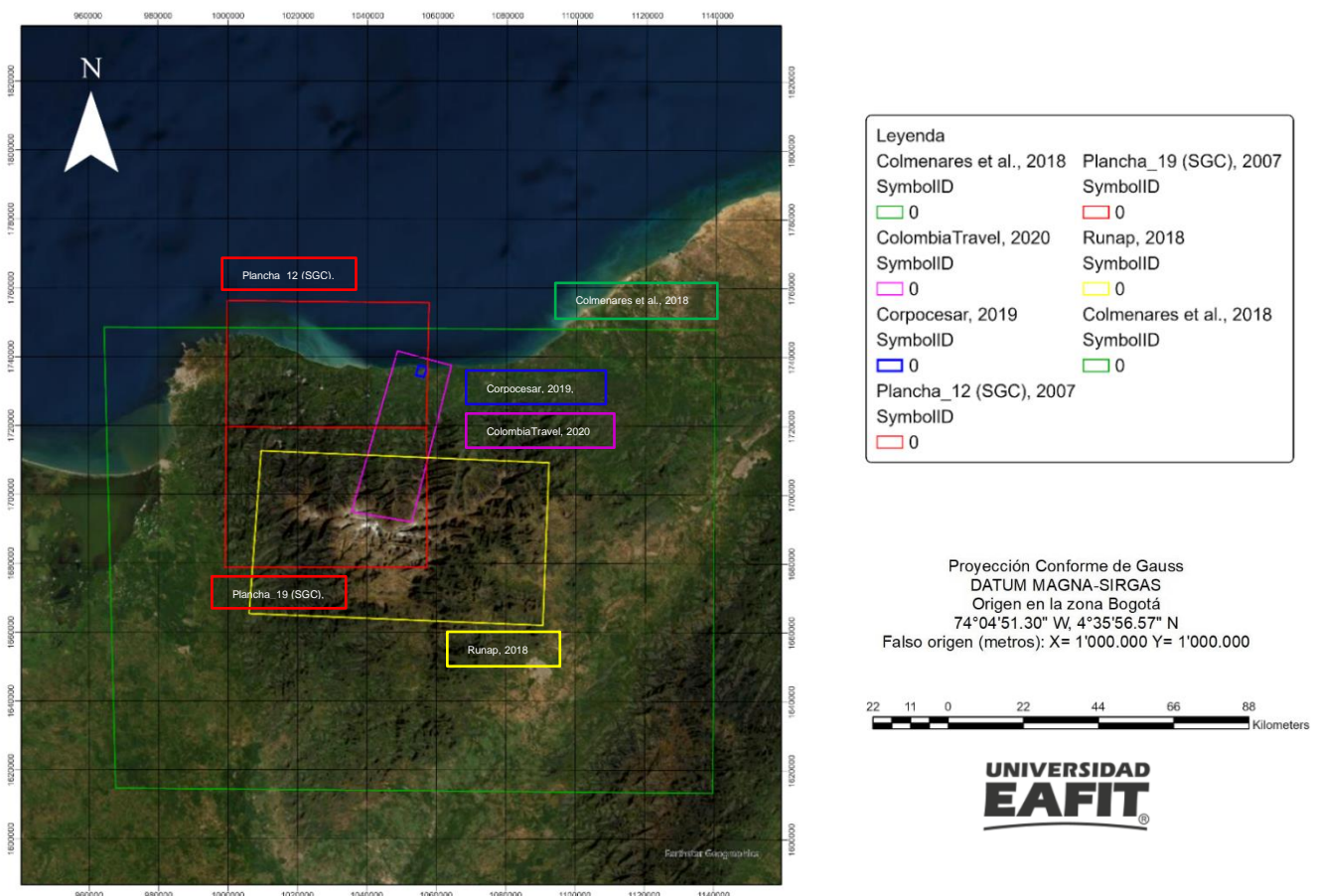
### 5.1 Conformación de la base de datos e inventario de LIG's

La información secundaria recolectada para el inventario de datos se tuvo en cuenta, las áreas de Reserva Nacional de la Sociedad Civil (RUNAP), los insumos de la cartografía geológica y geomorfológica del servicio geológico colombiano (1:100.000), artículos científicos que aportaron con la investigación de la geología regional como: Tschanz et al., (1969), Colmenares et al., (2003), Cardona et al., (2006) y páginas de turismo, información contenida en el portal de Parque Nacionales de Colombia (**Fig. 9**).

Para la conformación de las bases de datos y el inventario de lugares de interés con el fin de cuantificar la geodiversidad, se tuvieron en cuenta principalmente los factores físicos de la cuenca, siendo ella una cuenca que contiene 10 subcuencas (**Tabla 1**), nace en una altura aproximada de 5600 metros sobre el nivel de mar, su morfología es ovalada a rectangular, de tipo exorreica, es decir, una cuenca abierta que desemboca en el mar que ocupa un área de  $68.3 \text{ km}^2$ , su cauce principal alcanza unos 70 km de longitud y desemboca en el mar Caribe.

**Tabla 4.** División de las subcuencas que conforman la cuenca del río Palomino.

Subcuencas del río Palomino	Área (ha)
Arroyo El Puerco	2369.48
Quebrada Mamaica	5339.73
Q. Mamarongo	1640.77
Q. Mula	4041.55
Q. Nabucaisi	2552.49
Q. Palomino	3047.35
Q. Sulue	2630.94
Rio Lucuici	8644.76
Rio Minacatue	2212.43
Rio Quices	1057.46
<b>Total</b>	<b>33536.97</b>



**Figura 9.** Mapa de ubicación de los estudios realizados en la cuenca del río palomino en PNN SNSM, y bloque Maracaibo.

A partir de la información recopilada, se planteó la historia geológica de la cuenca tomando como base los sucesivos eventos geológicos, que han dado origen a las rocas que allí afloran. Estos eventos son: Grenvilliano (Precámbrico), Post-Pangea (sedimentación y magmatismo del Triásico-Jurásico); Magmatismo Cenozoico y Sedimentación del Cuaternario.

### 5.1.1 Historia geológica

**El evento grenvilliano**, se dio hace aproximadamente 1100 Ma, generando la conformación del supercontinente Rodinia. Pequeños retazos litosféricos en facies granulitas, han sido identificados en la Sierra Nevada de Santa Marta (Cardona et al, 2006). En el área de la cuenca, afloran las siguientes unidades:

- ✓ **Granulitas de los Mangos (P $\epsilon$ m)**, corresponden a un conjunto de rocas metamórficas de alto grado en facies (granulitas, anfibolitas y neises). Ordoñez et al. (1999), reportan edades Sm-Nd, entre 1.47 y 1.92 Ga valor que es interpretado como la edad del metamorfismo de facies granulita responsable de la formación está asociada con la orogenia Greenville.
- ✓ **Gneis de los Muchachitos (PZm)**, corresponde a la secuencia metamórfica de grado medio, la única datación de el “Neis de Los Muchachitos” corresponde a Cardona (2007), este análisis arrojó una edad de  $279,5 \pm 2,5$  m.a esta datación confirma la edad Permiana.

Los eventos sucedidos después de la conformación del supercontinente Pangea, se han evidenciado en la Sierra Nevada de Santa Marta, con **ciclos de sedimentación, vulcanismo y magmatismo** durante el Triásico y Jurásico (Tschanz et al. 1969). Las rocas que afloran en la cuenca son:

- ✓ **Formación Guatapurí (TJg)**

La Formación Guatapurí representa una serie de depósitos vulcanoclásticos y sedimentarios de color rojo, morado y púrpura, esta unidad denominada por

Tschanz et al. (1969) para referirse a la secuencia Mesozoica rojiza y se le han asignado un intervalo de edad Triásico temprano a Jurásico temprano, con base en la correlación con los sedimentos rojizos de la Cordillera Oriental de Colombia

### **Magmatismo jurásico (Cinturón central de batolitos)**

#### ✓ **Batolito Central (Jc)**

Corresponde a un cuerpo plutónico de composición granodiorítica que aflora en la parte central de la SNSM, incluyendo los picos nevados de Ojeda y Codazzi. dataciones radiométricas K-Ar del batolito arrojo edades de  $172 \pm 7$  jurásico medio a inferior (Tschanz et al., 1969).

#### ✓ **Batolito de Aracataca (Jar)**

Es un cuerpo intrusivo alargado orientado S – N y SSW – NNE, que se halla al oriente de la población de Fundación; la roca predominante es cuarzo monzonita con una datación radiométrica K-Ar con edades de  $166 \pm 6$  m.a, asignado como jurásico medio (Tschanz et al., 1969).

#### ✓ **Batolito de Atánquez (Ja)**

Representado por un cuerpo intrusivo que consta de rocas de granodioritas y cuarzo monzonitas, con dataciones radiométricas K-Ar que van de  $57,3 \pm 2,4$  a  $162 \pm 12$  Tschanz et al. (1969).

#### ✓ **El Batolito de Bolívar (Jb)**

Es un cuerpo plutónico de composición tonalítica a granodiorítica (Gansser, 1955), que aflora en la parte alta al occidente de la SNSM, especialmente hacia el pico Bolívar (5.800 msnm, aproximadamente). Estas rocas presentan edades radiométricas K-Ar de  $166 \pm 6$  m.a asignándole a este cuerpo edad de Jurásico medio.

Hacia el Cenozoico y como un reflejo de los **eventos asociados a la Orogenia Andina** y la interacción de la Placa Caribe, se dio el emplazamiento de intrusivos del Eoceno, como la **Cuarzomonzonita de Palomino**. Esta unidad corresponde a

un cuerpo plutónico de carácter ácido, presenta rocas como cuarzomonzonitas, monzogranitos, sienogranitos y granodioritas, de textura holocristalina, hipidiomórfica, de grano medio a grueso, color rosado y gris claro. Compuestas por QAP (15 a 47:25 a 37:16 a 60), minerales máficos (biotita, clorita y anfíbol) y como minerales traza titanita y circón Tschanz et al. (1969).

**Finalmente, hacia el Cuaternario**, los principales agentes modeladores del relieve en la Sierra Nevada de Santa Marta en el cuaternario, tiene que ver con dinámica glacial y aluvial. En la cuenca del río Palomino afloran los siguientes depósitos recientes... revisar los que quedan acá

✓ **Morrenas y fluvio-glaciares (Qm)**

Depósitos asociados en los sectores de valles altos en U, producto del deshielo de los picos nevados Colon, Ojeda, Simón Bolívar, Las Cuchillas entre otros. Estas áreas han reducido su extensión de hielo y gracias a la erosión producto al deshielo afloran bloques caóticos angulares, polimígticos de rocas metamórficas precámbricas e ígneas intrusivas jurásicas.

✓ **Terrazas aluviales (Qt)**

Estas terrazas de la SNSM ubicadas al norte y noreste, están constituidos por capas delgadas de areniscas amarillas, de grano grueso a medio, capas gruesas canaliformes de conglomerados clastosoportados, polimígticos angulares a subredondeados muy mal seleccionados.

✓ **Aluviones recientes (Qal)**

Depósitos de litología suave y baja no consolidados de arenas, gravas y guijarros en matriz lodosa, mal seleccionados, con cantos de rocas ígneas del batolito central y metamórficas, registrando así la erosión de todas las unidades geológicas de la SNSM.

### **5.1.2 Inventario de LIG's**

El inventario de lugares de Interés Geológico consta de 31 puntos de interés seleccionados a partir de información secundaria, tomando como criterio los

reportes de interés científicos, paisajísticos, culturales y turísticos reportados en los diferentes medios de comunicación (artículos, boletines turísticos, programas de televisión, entre otros) **(Fig 12)**. Adicional a ello, se añadieron puntos de interés de avistamiento de fauna y flora como el oso de anteojos o especies de flora endémicas en el páramo y bosques andinos, zonas de interés geológico como contactos de unidades litológicas, depósitos glaciares, drenajes principales y tributarios donde el público realiza actividades recreativas y depósitos recientes.

En estos lugares de interés geológico tienen un propósito en común y es brindar información de divulgación científica, beneficiando no solo las actividades culturales y socioeconómicas de la región, si no, una brecha para hacer buen uso del recurso y se pueda preservar a lo largo de los años. Estos Lugares no tienen un patrón definido **(Fig.12)**. En ellos cabe destacar las zonas glaciares, debido a la importancia que tienen al momento ser fuente del recurso hídrico **(Tabla, 5)**, representado por los picos Colon, Ojeda y Pico Codazzi la cual se les agrego un porcentaje de importancia alto debido a su gran factor paisajístico y la necesidad de que sea geoconservado. Por otro lado, se concentran la mayoría de los lugares de interés sobre los costados del cauce principal del rio Palomino, debido a que en él se desarrollan gran parte del desarrollo socioeconómico y cultural representados por actividades acuáticas (Kayak, Tubing), asentamientos Atigumake, pesca, avistamiento de fauna y flora.

**Tabla 5.** *Tabla de los lugares de interes geologico propuestos por el experto y su porcentaje de importancia*

Numero	Lugares de interés geológico	Descripción	Porcentaje %
1	<b>Pico Cristóbal Colón</b>	Ubicada en la zona norte de la cuenca en las áreas más altas, son actuales residuos de las grandes glaciaciones ocurridas en el planeta	4.34
2	<b>Cerro Griere</b>	Ubicado en las áreas medias de la cuenca. Son la elevación de tierra aislada que presenta una altura menor a 200 metros, en ella se puede ver	2

		una panorámica de la zonas bajas y altas de la cuenca de la cuenca	
3	<b>Bosque Andino (Osos de Anteojos)</b>	Son los bosques, selvas de montaña lluviosos, nubosos, templados y fríos, ubicados en las zonas medias a altas de la cuenca. En ella se contemplan ejemplos de fauna endémica como el oso de anteojos.	4.34
4	<b>Cerro el mono</b>	Ubicado en las áreas medias de la cuenca. Son la elevación de tierra aislada que presenta una altura menor a 200 metros, en ella se puede ver una panorámica de la zonas bajas y altas de la cuenca de la cuenca.	2
5	<b>Asentamiento Atigumake</b>	Comunidad indígena donde se pueden realizar actividades ecoturísticas.	2.5
6	<b>Desembocadura Rio Palomino</b>	Corriente de agua desemboca en mar, se encuentra en la parte más norte de la cuenca, posee un atractivo turístico importante para el municipio.	4.34
7	<b>Aldea Kogui Seiviaka</b>	Comunidad indígena donde se pueden realizar actividades ecoturísticas.	3.5
8	<b>Pozo Caimán</b>	Ubicado en la zona media de la cuenca, atracción turística en el drenaje.	3
9	<b>Puente Palomino</b>	Estructura ubicada en la desembocadura del rio en el mar caribe, posee un atractivo turístico importante para el municipio.	2
10	<b>Avistamiento de reptiles</b>	Ubicado en la zona media de la cuenca, en ella hay actividades de avistamiento de reptiles que habitan en la zona.	3.5
11	<b>Pico Ojeda</b>	Ubicada en la zona norte de la cuenca en las áreas más altas, son actuales residuos de las grandes glaciaciones ocurridas en el planeta	4.34
12	<b>Rutas Kayak</b>	Deporte acuático, donde se aprecian los paisajes y distintos ecosistemas que hay en la cuenca	2.5
13	<b>Mirador</b>	Panorámica del área de estudio	1

14	<b>Avistamiento flora</b>	Ubicado en la zona media de la cuenca en ella se puede realizar actividades de avistamiento de flora como heliconias y otras especies endémicas de la cuenca	3.5
15	<b>Paseo de Heliconias</b>	Ubicado en la zona media de la cuenca en ella se puede realizar actividades de avistamiento de flora como heliconias y otras especies endémicas de la cuenca	3.5
16	<b>Depósitos Glaciares (Morrenas)</b>	Ubicados en las zonas altas de la cuenca son sedimentos depositados directamente por un glaciar. El glaciar baja desde alturas considerables y arrastra los materiales que encuentra en su camino.	4.34
17	<b>Depósitos Glaciares (Morrenas)</b>	Ubicados en las zonas altas de la cuenca son sedimentos depositados directamente por un glaciar. El glaciar baja desde alturas considerables y arrastra los materiales que encuentra en su camino.	4.34
18	<b>Contacto Granulitas-Batolito SM</b>	Contacto geológico de las Granulitas de los Mangos con el Batolito de Santa Marta	4.34
19	<b>Colinas Remanentes</b>	Ubicadas en las zonas bajas y medias son cimas redondeadas y amplias limitadas por laderas cortas a moderadamente largas de forma convexa	3
20	<b>Terrazas marinas</b>	Ubicada en las zonas bajas de la cuenca, las terrazas son superficies elevadas horizontales a subhorizontales que sufren un desnivel respecto al nivel del mar	3.5
21	<b>Escarpes línea de falla</b>	Plano vertical que relaciona las superficies definidas por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas afectadas por procesos de erosión acentuada.	3
22	<b>Escarpe línea de falla</b>	Plano vertical que relaciona las superficies definidas por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas afectadas por procesos de erosión acentuada.	3

23	<b>Sistema de Paramo</b>	Ubicado en las zonas media y altas de la cuenca es un ecosistema alpino intertropical, en él se encuentran especies de flora endémicas como el frailejón, importantes reguladores del recurso hídrico	4.34
24	<b>Paramo</b>	Ubicado en las zonas media y altas de la cuenca es un ecosistema alpino intertropical, en él se encuentran especies de flora endémicas como el frailejón importante reguladores del recurso hídrico	4.34
25	<b>Cerro Caracas</b>	Ubicado en las áreas medias de la cuenca. Son la elevación de tierra aislada que presenta una altura menor a 200 metros, en ella se puede ver una panorámica de la zonas bajas y altas de la cuenca de la cuenca	2
26	<b>Resguardo Kogui Arsario</b>	Comunidad indígena donde se pueden realizar actividades ecoturísticas	2.5
27	<b>Asentamiento</b>	Comunidad indígena donde se pueden realizar actividades ecoturísticas	1
28	<b>Depósitos Glaciares</b>	Ubicada en la zona norte de la cuenca y se caracterizan por ser sedimentos compuestos por materiales depositados directamente por el glaciar, los cuales no tienen estratificación y sus fragmentos presentan estrías.	4.34
29	<b>Depósitos Glaciares</b>	Ubicada en la zona norte de la cuenca y se caracterizan por ser sedimentos compuestos por materiales depositados directamente por el glaciar, los cuales no tienen estratificación y sus fragmentos presentan estrías.	4.34
30	<b>Pico Codazzi</b>	Ubicada en la zona norte de la cuenca en las áreas más altas, son actuales residuos de las grandes glaciaciones ocurridas en el planeta	4.34
31	<b>Asentamiento</b>	Comunidad indígena donde se pueden realizar actividades ecoturísticas	1

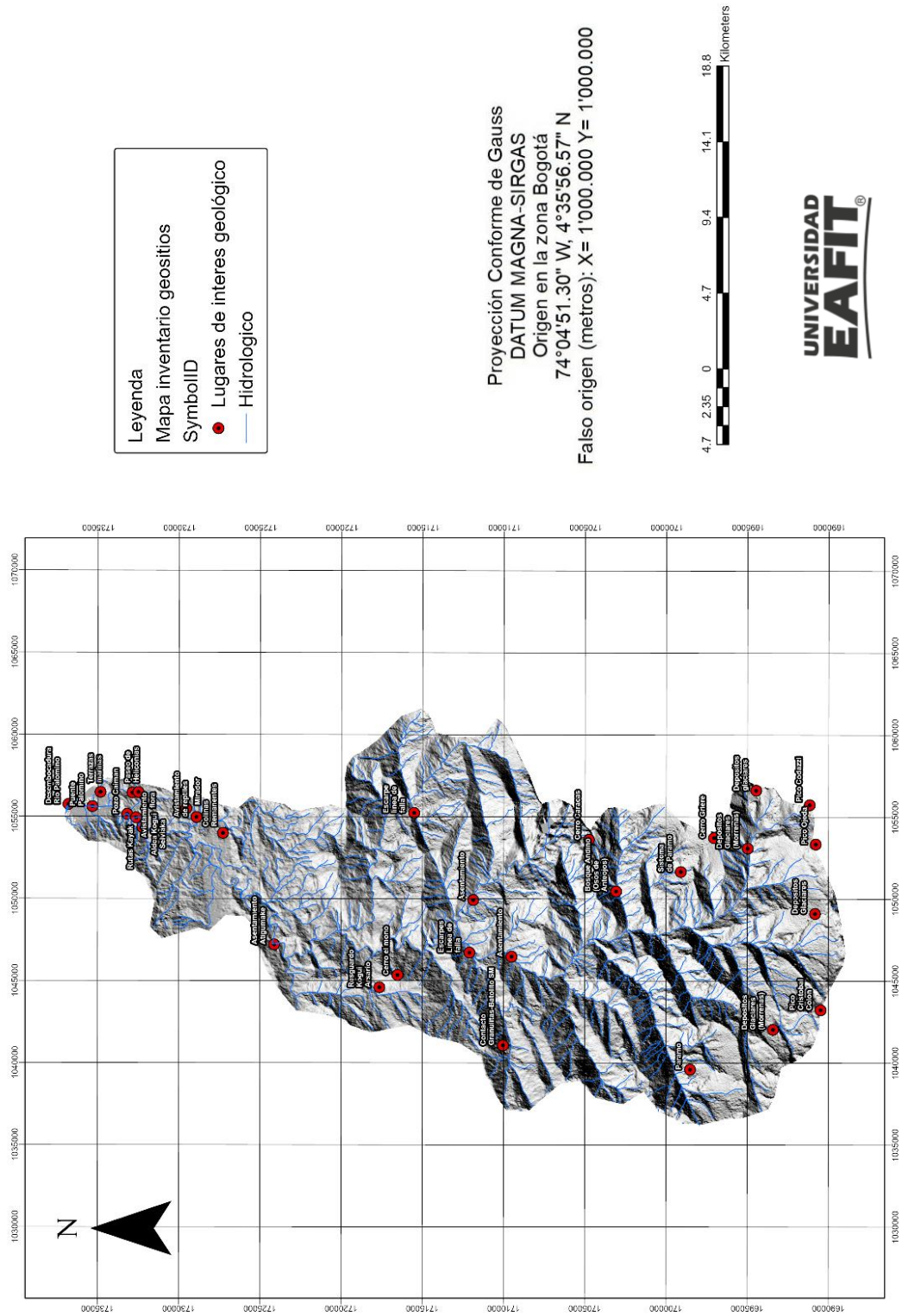
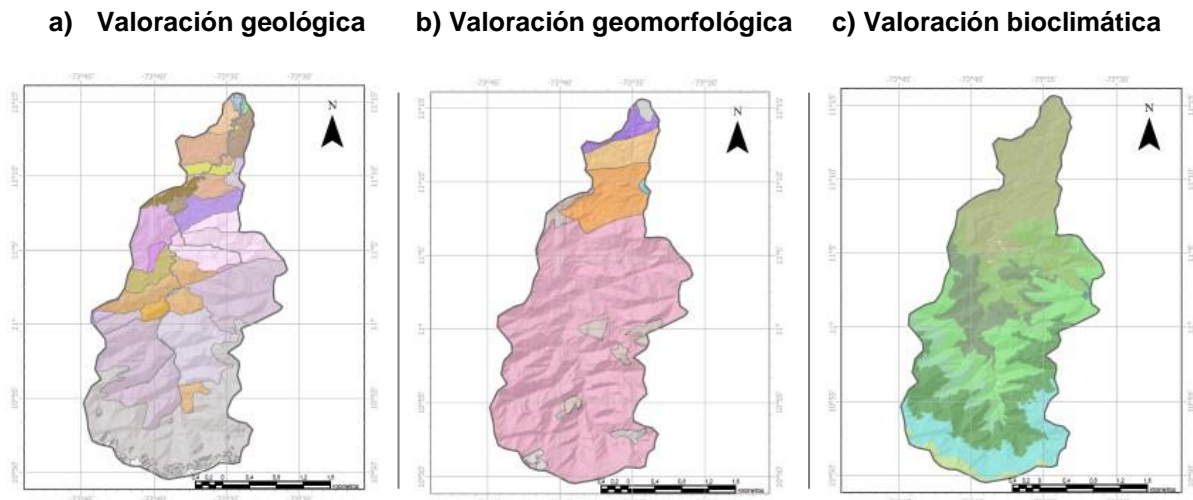


Figura 12. Mapa de inventario geositios en la cuenca del rio Palomino.

## 5.2 Metodología de Najwer et al. (2016)

La metodología para esta estimación, que se explicó en el numeral anterior y se realizó mediante las siguientes capas de entrada: “variación geológica”, “variación geomorfológica” y “valoración bioclimática” (**Fig. 13**). El ráster producto, identifica en la zona de estudio, valores de geodiversidad 1 (**muy bajos**), 2 (**bajo**), 3 (**medio**), 4 (**alto**), 5 (**muy alto**).



**Figura 13.** Capas de entrada geológica, geomorfológica, bioclimática para la valoración de geodiversidad a partir de la metodología de Najwer et al., (2016)

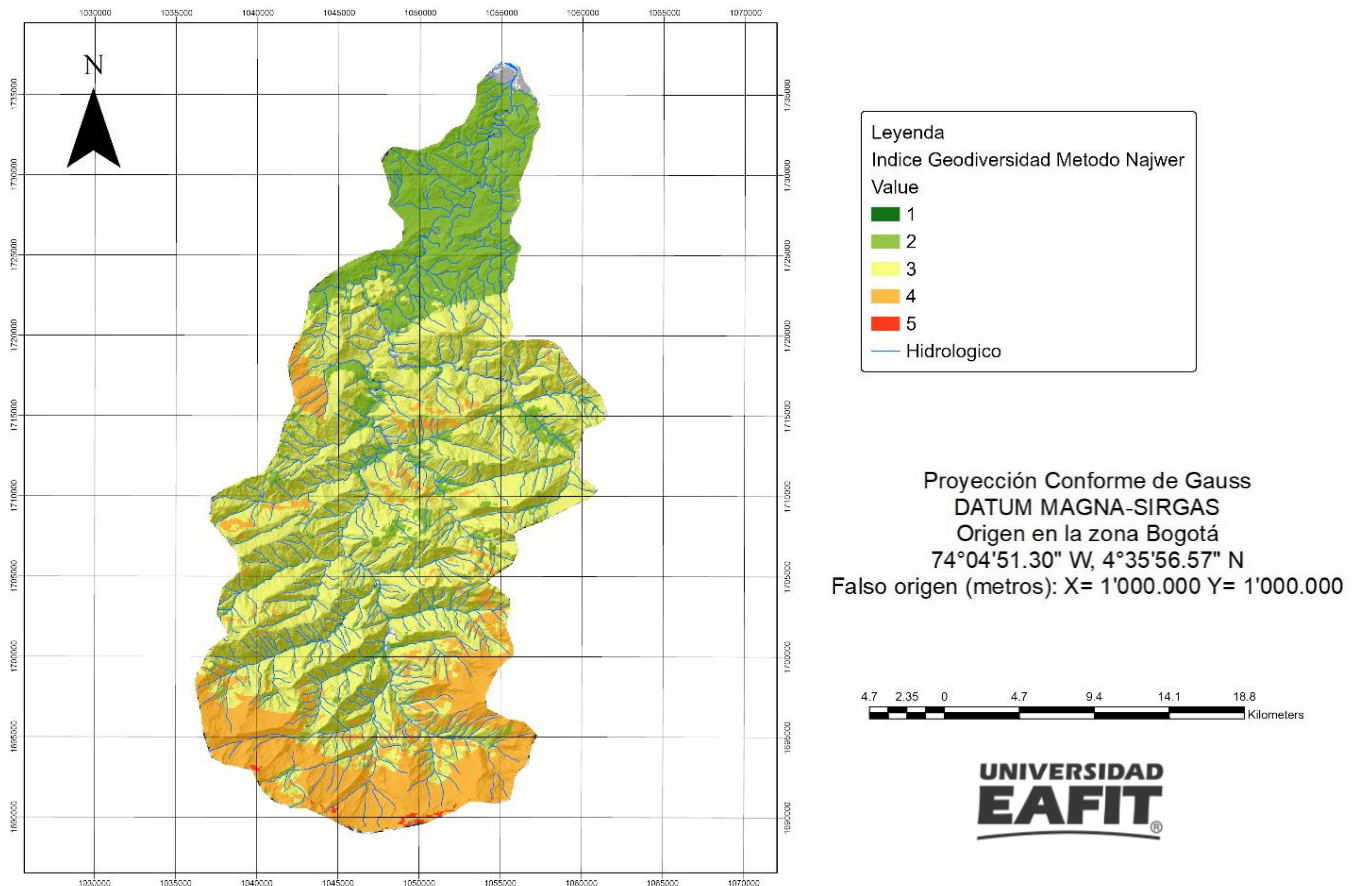
El análisis morfométrico se reclasificaron las variables de pendientes y el relieve relativo mediante el método de clasificación de datos “natural breaks”, asignándoles por entrada valores de 1 a 5 según su rango, siendo el de pendientes de <3 a 100% y el relieve relativo de 0 a 288.284.

La reclasificación de la geomorfología, se realizó mediante la influencia del cauce principal algunos tributarios, estructuras, y su morfología, siendo **1** Espolón facetado de longitud larga, moderada y corta, cerro residual, escarpe de erosión mayor, montículo denudacional, **2** Sierra denudada, escarpe facetado, escarpe erosión mayor, sierra glaciada **3** Lomo denudado, lomo remanente disectado, **4**

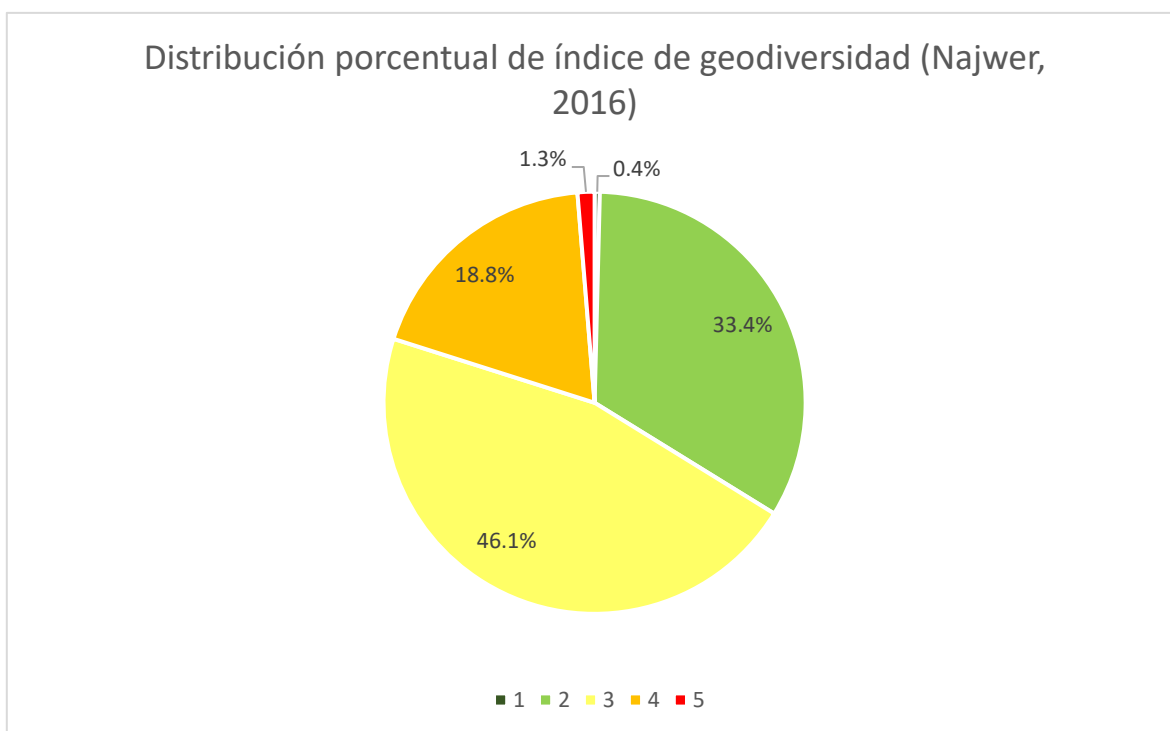
Colina remante, barra puntual, barra longitudinal, lomo de falla, morrenas, circo glaciar, masa glaciaria, marismas **5** Cauce aluvial, terraza de acumulación, terrazas de erosión, playas, terrazas costeras, laguna glaciaria. **(Tabla 3)**

La reclasificación geológica se basa en la influencia litológica, junto su interacción con las fallas y los lineamientos inferidos siendo **3** Gneis de los muchachitos, granulitas de los magos, cuarzomonzonita de Palomino, **4** Batolito central, Santa Marta, Bolívar, formación Guatapurí, **5** Depósitos glaciares y cuaternarios. **(Tabla 3)**

La influencia bioclimática en la cuenca está muy influenciada por su ubicación geográfica y sus características orogénicas especiales, se le asignaron valores de **3** Frio super húmedo, semihúmedo, húmedo, **4** Extremadamente frio super húmedo, Templado super húmedo, nival superhúmedo, **5** Cálido semihúmedo, templado húmedo, Semihúmedo. **(Tabla 3)**. Esta clasificación fue de utilidad para separar zonas de interés geológico acorde a los factores abióticos reunidos y que pueden verse en la cartografía. **(Fig. 14)**



Gracias a la cartografía, se logró identificar una distribución porcentual en el índice de geodiversidad, este análisis demostró que las categorías con menos porcentaje fueron el índice 1 con un (0.4%) y el índice 5 con un (1.3%), que corresponde a importancia muy baja y muy alta, sin embargo, los porcentaje más altos se obtuvieron en los índices 2 (**bajo**), 3 (**medio**), 4 (**alto**), observándose que los índices 2 se concentran en la parte baja de la cuenca, 3 en la parte media, y 4 en la parte media y alta de la misma. **(Fig. 15**



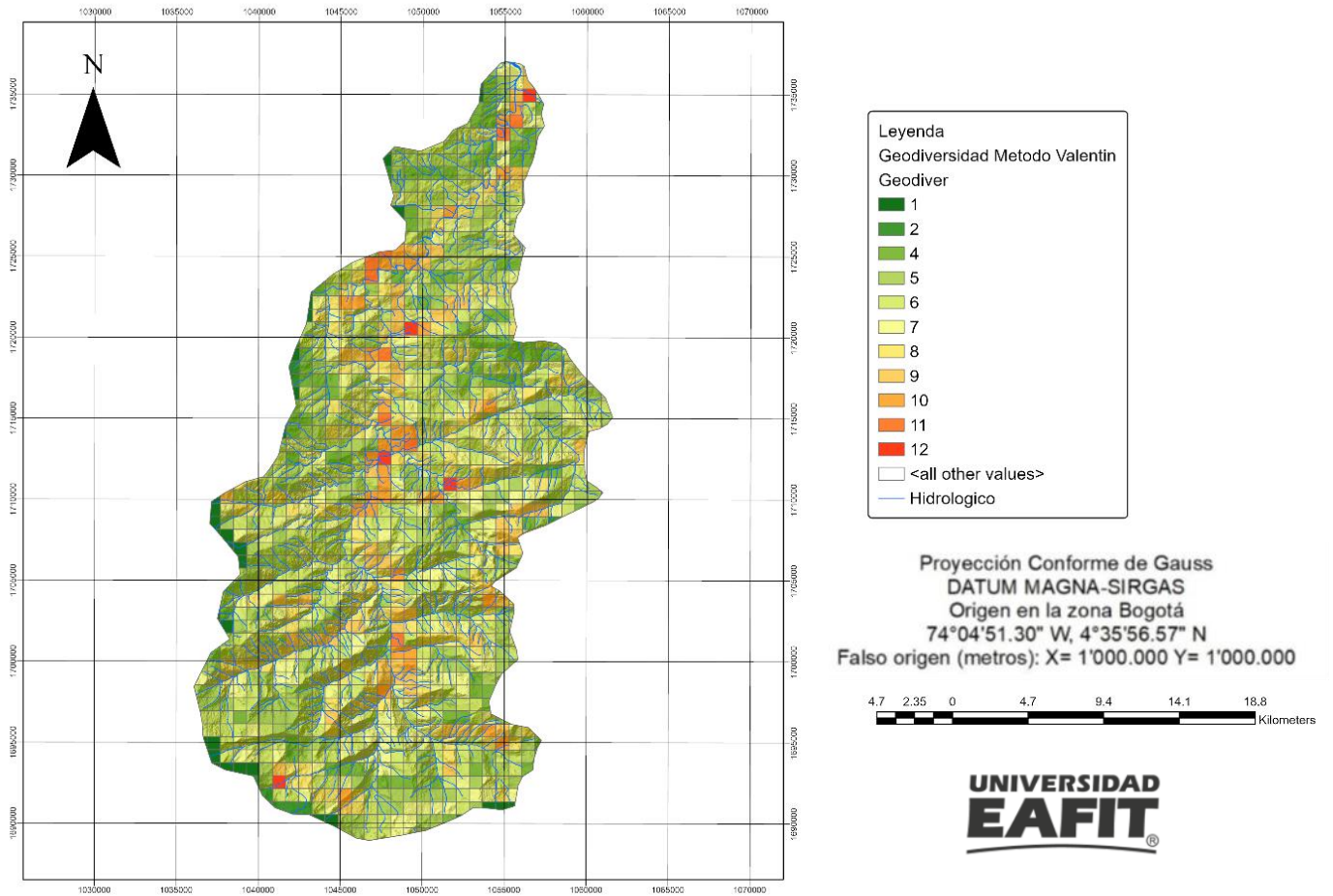
**Figura 15.** Distribución porcentual de *índice de geodiversidad* (Najwer,2016)

## 5.2 Metodología Valentin, 2021

Los primeros resultados de la siguiente metodología permitieron definir áreas de interés geológico a partir de la sumatoria de los subíndices de geodiversidad descritos a continuación:

- ✓ **Subíndice de diversidad geológica**
- ✓ **Subíndice de diversidad geomorfológica**
- ✓ **Subíndice de diversidad hidrológica**
- ✓ **Subíndice de diversidad estructural**
- ✓ **Subíndice de diversidad climática**
- ✓ **Subíndice de diversidad pedológica**

La sumatoria de dichos subíndices tiene como producto un mapa de índices de geodiversidad, el cual, presenta un rangos de 1 elemento abiótico hasta 11, correspondientes a los elementos que componen los subíndices de geodiversidad, que se encuentran ocupando el área de la cuenca de estudio, es decir, estas clases que comienzan desde 1 significa que al menos un elemento abiótico está ocupando un espacio en la zona, valores más altos son la sumatoria o superposición de varios elementos ubicados en el mismo espacio. En la figura 16 se observa que la mayor concentración de elementos abióticos en el mapa de índice de geodiversidad se encuentra ubicado en la zona central y sur de la cuenca, es decir, en las pendientes medias y altas, con una predominancia de mayor geodiversidad a lo largo y cercanías del cauce del río Palomino.

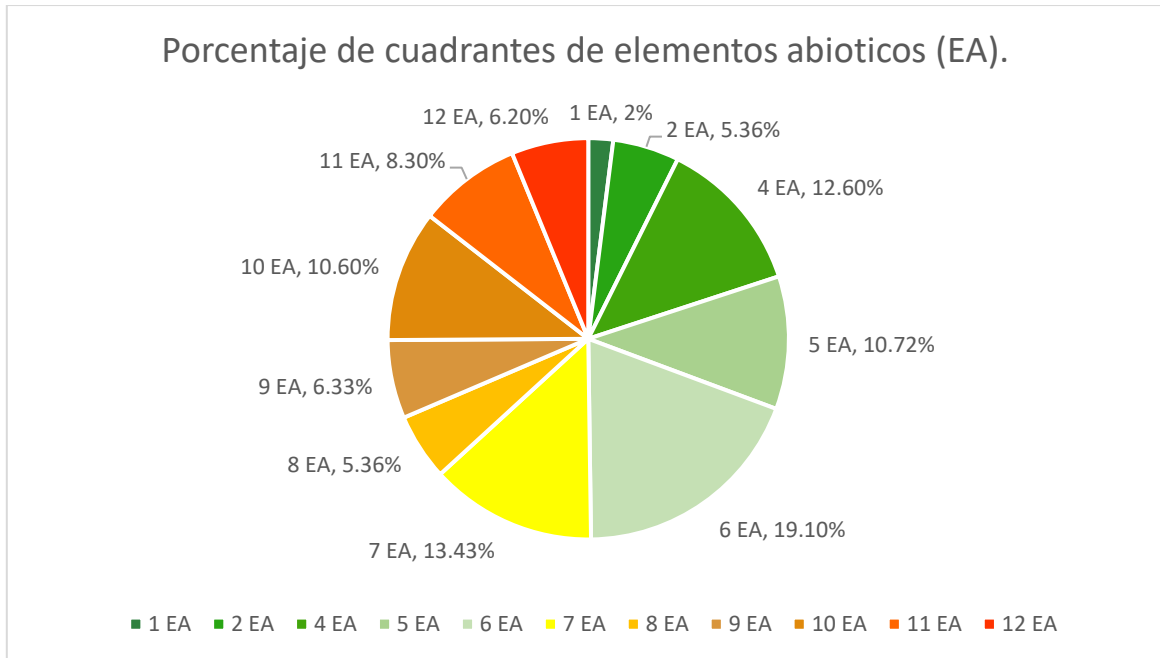


**Figura 16.** Mapa de geodiversidad a partir de la metodología (Valentin, 2021).

En el área de estudio predominan los cuadrantes con 6 elementos abióticos (19,1%), ubicados a lo largo de la cuenca, sin observar ningún parámetro de distribución. Por lo siguiente, los cuadrantes más abundantes son representados por el conjunto de elementos: 4 (12,6%), 6 (19,1%), 7 (13,43%), ubicados principalmente en el sector norte de la cuenca donde se encuentran las zonas más medias de la cuenca.

Las zonas donde más elementos abióticos se sumaron, se encuentran gran parte en cercanías al cauce del río Palomino, y la zona montañosa del área de estudio, en ella se encuentran los cuadrantes con presencia de 7 (13,43%), 9 (6.33%), y 11 (8.3%) elementos superpuestos (**Fig 17**), gracias a la gran variedad de unidades geomorfológicas, una red hidrológica abundante controlada fuertemente por lineamientos estructurales, y gran parte de los depósitos recientes ubicados en ella.

En la zona norte se encuentra la zona más llana de la cuenca, en ella se encuentran los valores más bajos agrupados por “parches”, debido a la ausencia de elementos abióticos ocupando un espacio en esa zona.



**Figura 17.** *Porcentaje de cuadrantes para elementos abióticos. (Valentin, 2021)*

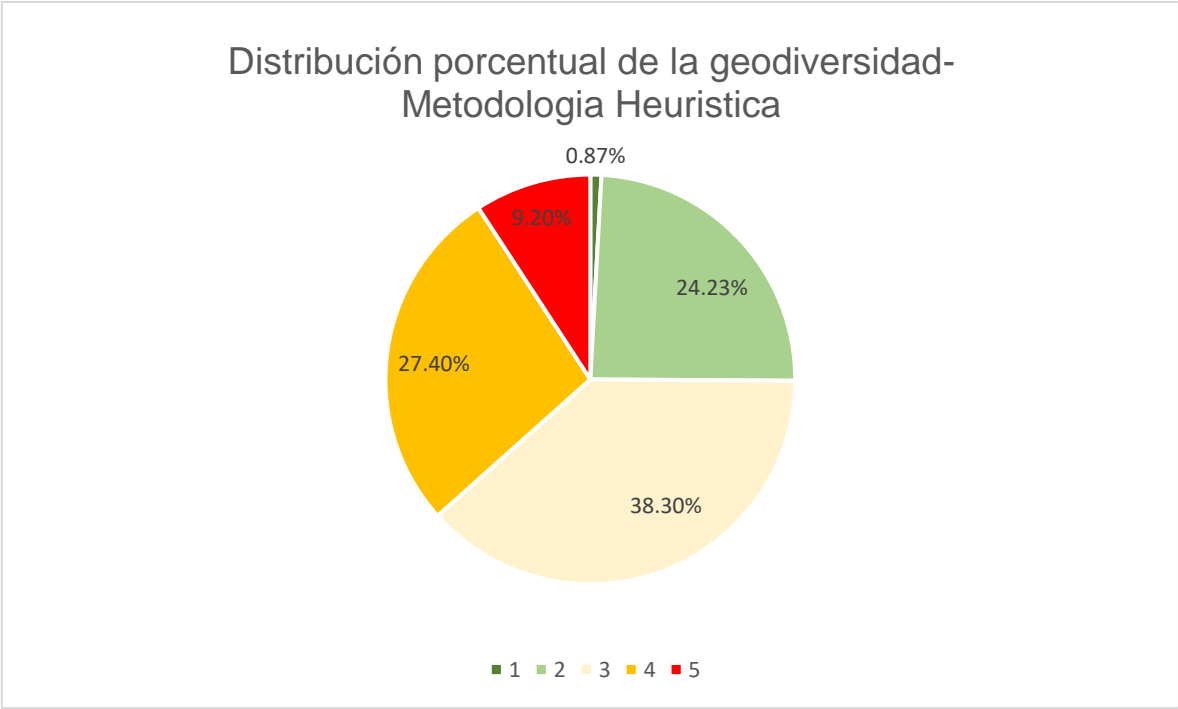
### 5.3 Método Heurístico adaptado

Para este método, se implementó la mayor cantidad de capas temáticas para precisar un mejor cálculo de la geodiversidad en el territorio, a partir del conocimiento y el criterio de la zona de estudio, las variables utilizadas para su clasificación que se pueden encontrar en detalle **(Tabla 3)**. Estas variables fueron reclasificadas en geodiversidad siendo **1** (muy bajo), **2** (bajo), **3** (medio), **4** (alto), y **5** (muy alto), además de asignar un peso a cada variable para el cálculo final del modelo.

La herramienta que se utilizó para este método fue la geodiversidad por Natural Breaks, las entradas analizadas de manera cuantitativa fue la geomorfología, geología, clima y ecosistema. Utilizando los mismos valores y parámetros, estas entradas se le asignaron los siguientes porcentajes de pesos: 27%, 15%, 15%, 13%. **(Tabla 4)**

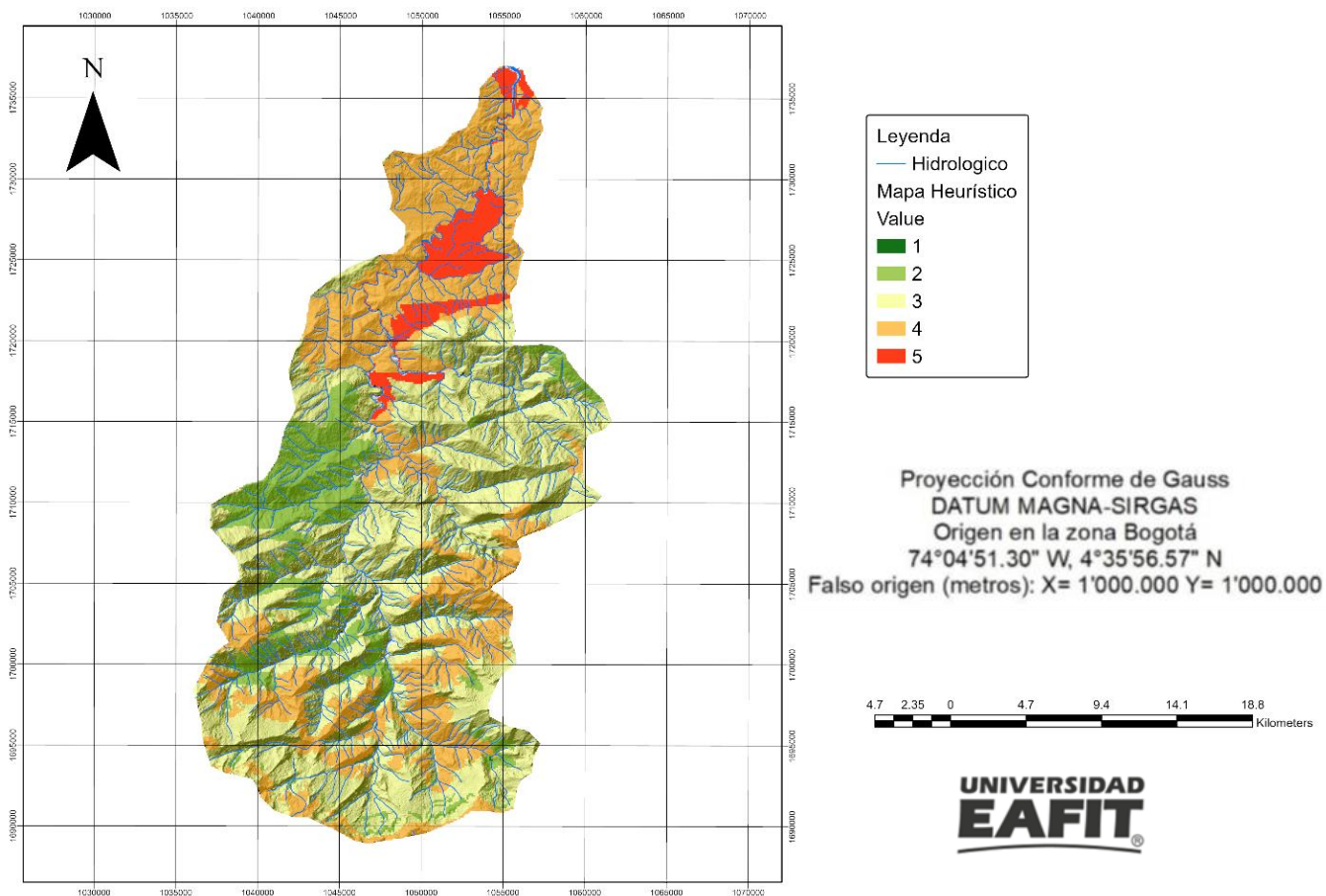
Por otro lado, capas de entrada como la hidrología, se realizó a partir del orden de los afluentes, teniendo los valores más altos los de mayor orden y los valores más bajos ordenes menores de la siguiente manera: orden de drenaje **1** (valor 1), orden de drenaje **2** (valor 2), orden de drenaje **3** (valor 3), orden de drenaje **4** (valor 4) y orden de drenaje **5** (valor 5). Se asignó un peso del 20% para esta capa dentro del modelo **(Tabla 4)**.

Gracias a la sumatoria de las variables descritas anteriormente se generó como resultado la distribución porcentual de la geodiversidad en el territorio **(Fig. 18)**. Donde se logra identificar que las categorías con menores porcentajes fueron muy bajo y alto correspondiendo a los valores de **1** y **5**. Por otro lado la mayor concentración de geodiversidad corresponde a las categorías **2** (bajo), **3** (medio), **4** (alto)



**Figura 18.** *Distribución porcentual de la geodiversidad a partir de la metodología heurística.*

Respectivamente, se realizó la cartografía de geodiversidad (**Fig 19**). Donde es claro identificar que las zonas con más índice de geodiversidad son las que están en las zonas más bajas de la cuenca, debido al peso que se le otorgó por su actividad turística y ecoturística, sumado a las variables geológicas recientes y ambientes geomorfológicos asociados a las cercanías del cauce principal.



**Figura 19.** Mapa de geodiversidad mediante la metodología heurística.

## 6. DISCUSIÓN

En la presente investigación se desarrolló un cálculo de geodiversidad con metodologías cuantitativas, las herramientas empleadas para la cuantificación de los elementos abióticos, permitió generar una cartografía que no solo facilita la lectura al público interesado en temas de investigación y conservación, si no que, aporta con datos reales un panorama más amplio sobre la importancia de dichos elementos que existen en el aérea de estudio, generando así un mayor impacto

socioeconómico, cultural en la región y un alcance positivo para la autoridad del país sobre la futura toma de decisiones.

Gracias a la metodología heurística adaptada, se logró complementar la metodología de Najwer et al., (2016), que estima la geodiversidad, sin embargo, como no deja de ser un análisis de expertos, se decide adaptar dicho concepto para darle un peso adicional fuerte a las relaciones bióticas y abióticas, con el fin, la gestión del territorio, lo que permite que este análisis sea una mejora en la planificación, en zonificar y lograr proponer nuevas zonificaciones apropiadas para la geoconservación.

Las metodologías se analizaron de una manera detalla, con el fin de evitar una sobreestimación en los parámetros, así mismo, reduciendo la subjetividad en el cálculo de geodiversidad, lo que permite una mejor visión de las características y procesos que ocurren en el aérea de estudio, de tal manera que facilita, la lectura de las zonas que posiblemente deben ser conservadas, si no que pueden llegar a complementarse, siendo un gran apoyo para la futura toma de decisiones en el territorio.

Cabe resaltar que al no tener en cuenta la sobreestimación de los factores abióticos, el modelo puede convertirse en un mapa más complejo y dificulta su comparación con otras metodologías, sin embargo, este proceso depende de cada autor, su enfoque y objetivo.

Con base a los resultados obtenidos en la cartografía y a los análisis mismos, cabe resaltar que la cuenca del río Palomino es de gran importancia para la geodiversidad del caribe colombiano, debido a su gran número de factores abióticos que se encuentran en él, como son de destacar, las gran variedad de pisos térmicos que varían de zonas glaciares con alturas hasta de 5770 metros sobre el nivel del mar, seguidos por bosques andinos, hasta zonas de pisos cálidos cercanas al mar caribe, por otro lado, una gran variedad de recursos naturales y servicios ecosistémicos

que mantienen el balance un potencial paisajístico modificado a partir de sus geoformas actuales y heredadas, que explican una evolución producto a la neotectónica de la región y a los procesos exógenos que modelan la corteza terrestre.

La cuenca del río Palomino presenta valores altos de geodiversidad debido a su gran potencial turístico, ecoturístico y geoturístico de la región, por lo cual, cabe resaltar que es de importancia se considere su geoconservación e incluso iniciar procesos de recuperación en las zonas afectadas por la actividad antrópica.

El método empleado para dicho cálculo, permitió identificar que existe una correlación de los subíndices de diversidad, lo que permite que podemos realizar el cálculo de diversidad con una o múltiples variables, esto hace que el cálculo sea flexible y siga arrojando datos reales, convirtiéndose en una herramienta que se pueda utilizar incluso hasta en otras ramas del conocimiento, como es el ordenamiento territorial, ámbito de gestión del riesgo y sus amenazas, entre otros.

## **6.1 Análisis de las metodologías**

El análisis de las metodologías de Najwer, Valentin y heurístico adaptado, comparten una similitud y es que sus índices altos de geodiversidad se concentran gran parte de los en el cauce del río Palomino sus cercanías, esto se debe, a las variedades en las unidades geológicas, geomorfológicas y estructurales de los mapas temáticos, generando así, una sobreestimación o subestimación de los elementos abióticos, para ello, se realizó una metodología completamente heurística que le otorga sensibilidad al modelo gracias al criterio del experto, que le permite identificar de manera ordenada la importancia que se le puede otorgar a dichas sobreestimaciones.

Al realizar un análisis comparativo de las tres metodologías, el modelo con mayor veracidad en la cuenca del río Palomino, es el método del **Modelo de densidad de**

**elementos abióticos (Valentin, 2021)**, debido a que, el representan con mayor detalle y precisa, gracias a la buena cantidad de capas de entrada que puede abarcar en el área de estudio, y permite realizar hace un buen empalme con el método heurístico, mientras que en el **Modelo multicapa (Najwer et al., 2016)**, presento variables con incertidumbres debido a la sobreestimación del grado de importancia y no permite que exista un grado de sensibilidad para las condiciones físicas del terreno, sin mencionar, que en este método no aloja varios elementos abióticos que podrían mejorar su estimación.

Con base a la distribución porcentual de los tres modelos de geodiversidad, se logró identificar que existe una predominancia en la categoría media, seguida de la categoría baja, esto puede ser asociado a la falta de factores abióticos presentes en la zona ó el bajo nivel de importancia que le otorgó el experto, Por otro lado, se identifica una similitud relevante para las categorías muy bajas y altas para los tres modelos, correspondientes a las vertientes medias y bajas del río, zonas de paramos y glaciares.

Finalmente, se recomienda, programar salidas de campo en la zona de estudio, para darle una mejor calibración a los datos y a los modelos de cuantificación, así permite que el inventario de geositos sea más sólido y rigurosos en funciones turísticas, ecoturísticas y de patrimonio geológico, a su vez, se recomienda integrar diferentes tipos de información que sirvan como herramienta para conocer los rasgos abióticos en la región, sin generar una sobreestimación de los elementos que conforman la geodiversidad en la cuenca.

## **6.2 Validación de la geodiversidad**

la validación de la geodiversidad se realizó mediante el análisis y la comparación de los LIG's con las metodologías cuantitativas y cualitativas, esto logro demostrar que la metodología que más se ajusta al modelo y a los parámetros de sensibilidad otorgadas por el experto, es el método de Valentin, (2021), debido a que, el método

es muy versátil y permitió usar múltiples capas que abarcan la zona de estudio, donde las mismas capas de entrada se tuvieron en cuenta a la hora de realizar el inventario de los geositios, sin embargo, cabe resaltar que las otras metodologías dieron resultados muy positivos respecto al análisis de los LIG's, pero estuvieron más limitadas, ya que, en estas metodologías no usaron y recogieron la cantidad de factores o capas de entrada que se utilizaron para el método de densidad de elementos abióticos de Valentin, (2021).

Gracias a los productos cartográficos otorgados por las metodologías realizadas, se pudo complementar con la información secundaria de los puntos o lugares de interés geológico (LIG's), al hacer un análisis detallado de los valores más altos de geodiversidad en cada metodología se evidenció que hay una muy buena distribución del índice de geodiversidad en las superficies de paramo y síperparamo al sur de la cuenca ya que contienen de medios a altos, estas zonas a su vez, son es un área protegida del SINAP en el PNN ya que en la Sierra Nevada de Santa Marta posee una extensión de 402.549 ha, de las cuales 142.752 ha corresponden a superficies de páramo. Este parque cobija el 95% del ecosistema paramuno del complejo. El área que no está cubierta por PNN en el Complejo es de 8.268 ha (5 %), que se encuentran dentro de la figura del resguardo Arhuaco de la Sierra en los municipios de Aracataca y Fundación en jurisdicción de Corpamag y los municipios de Pueblo Bello y Valledupar en jurisdicción de Corpocesar 10 (**Tabla 6**). Áreas protegidas con jurisdicción en el Complejo de Páramos de la Sierra Nevada de Santa Marta. Este complejo de Páramos, en el cual se vela diariamente por tu protección, es un área protegida por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), en el existen otras estrategias complementarias por las comunidades locales y figuras internacionales de protección ambiental, particularmente, que velan por la conservación de las reservas de la biósfera, y figuras de ordenamiento territorial como las zonas de reserva forestal de la Ley 2 de 1959.

**Tabla 6.** Municipios que componen el PNN y las hectáreas de protección.

Categoría de manejo	Nombre del área protegida	Municipio	Año de creación	Área (ha)	Área (ha) en el complejo	% dentro del complejo
Parque Nacional Natural	Sierra Nevada de Santa Marta	Ciénaga, San Juan del Cesar, Fundación, Aracataca, Dibulla, Santa Marta, Riohacha y Valledupar.	1964	402.549,3	142.752,6	95%

Por otro lado, otras de los factores que comparte un gran índice de geodiversidad en las cuenca son las rondas hídricas en el sur de la cuenca, y estas se encuentran en zonas de protección por INDEREMA, (1971), al ser declaradas zonas de desarrollo de los recursos naturales renovables y de medio ambiente, ya que tienen una influencia importante no solo por el delicado aporte del recursos, producto al deshielo de los picos nevados Bolivar y Colon, sino también es el suministro de los resguardos indígenas que habitan en la cuenca y sus poblaciones aledañas que hacen provecho de dicho recurso hídrico, cabe destacar a su vez, las comunidades de la región aguas abajo usan el ecoturismo y aprovechan las zonas hídricas para la recreación (**Fig.20**), estas actividades son unos de los principales atractivos turísticos del área de estudio, ya que presenta un factor paisajístico atractivo. (**Fig,21 y Fig 22**).



**Figura 20.** Actividades ecoturísticas en río Palomino. Tomado de Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta



**Figura 21.** *Desembocadura del río Palomino en el mar caribe. Tomado de Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta*



**Figura 22.** *Fotografía panorámica de la cuenca del río Palomino aguas arriba (Factor paisajístico). Tomado de Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta*

Estas zonas protegidas, donde existen resguardos indígenas y hay actividades ecoturísticas, son fundamentales como apoyo para las metodologías cualitativas y cuantitativas, ya que, otorgan un criterio de sensibilidad a los métodos de cuantificación descritos anteriormente, por lo que lo hace una metodología importante al momento de hablar en términos de geodiversidad.

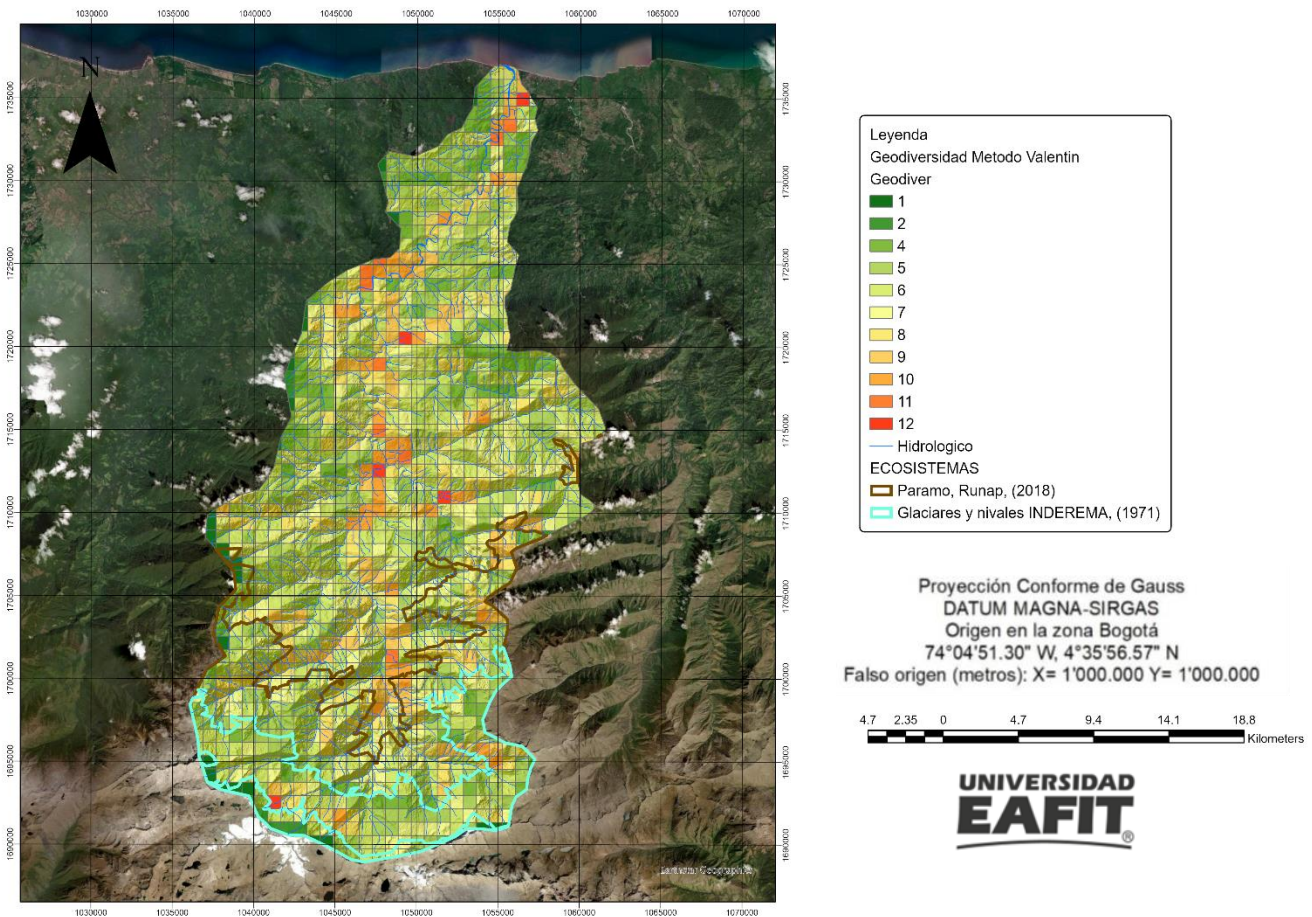
### **6.3 Gestión integral y geoturismo**

El contexto de la región donde se ubica la SNSM y la cuenca del río Palomino, se describe como una zona biodiversa, económicamente rica en recursos naturales, con un patrimonio cultural y étnico donde se arraigan pueblos ancestrales. El potencial de geoconservación y la gestión integral del patrimonio geológico lo hacen aún más importantes, que junto con esta investigación se le adiciona otros parámetros y variables a la cartografía de cuantificación de la geodiversidad, que no solo permiten tener un mejor panorama de las características abióticas de la zona, si no una mirada de valor a las actividades que existen en el área de estudio.

La cuenca del río palomino, es un atractivo turístico llamativo por sus actividades dentro de su afluente principal, las actividades en los resguardos indígenas, el factor paisajístico, entre otras actividades que ocurren en ella. A esto, se le puede sacar un mejor provecho, donde se puede agregar valor socioeconómico y cultural con los procesos de divulgación científica, esto de la mano con las autoridades del municipio y departamento, colaboración de entidades como Parques Nacionales, directrices UNESCO y muchos más organismos que apoyen a favor de las iniciativas de patrimonio geológico y conservación de las aéreas vulnerables.

Para la gestión integral y geoconservación de la cuenca del río palomino, se recomienda que se siga fortaleciendo las relaciones con los organismos de protección como **Runap, (2018)**, que delimita y declara los páramos como zona de protección y **INDEREMA (1971)**, que delimita las rondas hídricas importantes, debido, al importante desarrollo del recurso hídrico renovable en las zonas altas de

la cuenca (**Fig, 23**). Esto con el fin de que las zonas protegidas actualmente, tomen más fuerza, y a su vez, mediante las actividades de divulgación científica, dar a conocer estas zonas vulnerables ante el cambio climático, actividades antrópicas, entre otros factores, que afectan su entorno.



**Figura 23.** Mapa de metodología Valentin, (2021) junto con la delimitación de zonas de protección por Runap, (2018) y INDEREMA, (1971).

## 7. CONCLUSIONES

Las metodologías cuantitativas son el mejor prospecto para el cálculo de geodiversidad, de tal manera, que ilumina las características especiales que contienen el territorio y con los métodos heurísticos apoyan dicha iluminación mediante el criterio de expertos, que, dicho de esa manera, funciona como una herramienta que refuerza dicha conceptualización sobre qué y cuales zonas son las que deben ser geoconservadas.

La geodiversidad elaborada por métodos cuantitativos y cualitativos, permiten la interpretación, descripción, comparación y cuantificación de los distintos elementos abióticos que componen el paisaje, con base en criterios y factores: geológicos geomorfológicos, morfoclimáticos, pedológicos, entre otras variables que se convierten en una herramienta útil y objetiva para el entendimiento de la complejidad de los procesos exógenos que ocurren e interactúan en la corteza terrestre.

Las herramientas utilizadas para la cuantificación de los índices de geodiversidad mejoraron considerablemente los tiempos de procesamiento de datos, de esta manera, permite obtener resultados rápidos, con datos reales que generen impacto no solo en la comunidad científica, sino también en los organismos de control para futuras tomas de decisiones.

Cabe destacar que el uso de varias metodologías pueden generar una subjetividad o sobreestimación de los parámetros abióticos, que puede variar con los objetivos y alcances de cada experto, sin embargo, se debe tener en cuenta que la subestimación de estos parámetros puede hacer más compleja la interpretación de los índices, este análisis debe hacerse de manera minuciosa, teniendo en cuenta donde están ubicadas las variables que tienen más importancia en el área de estudio, el ejemplo más claro en el caso de estudio, es a gracias a la buena concentración de elementos como: la diversidad geológica, geomorfológica e hidrológica en el cause principal del río Palomino se encontró una sobreestimación

en los subíndices de geodiversidad, para ello, fue necesario hacer una metodología heurística adaptada, donde el experto detallo las zonas donde más se concentra los elementos abióticos, las actividades recreativas, culturales y socio económicas, así obteniendo como resultado una mayor claridad y un sesgo menor de las sobreestimación de los elementos.

Gracias a los resultados obtenidos en la cartografía y el análisis de los componentes, con la estimación de la geodiversidad adaptada que incluye la relación del factor biótico, se puede determinar que la cuenca del rio Palomino posee rasgos fuertes de geodiversidad, con contextos climáticos únicos que genera una gran variación de pisos térmicos, bien marcados por la presencia de fauna y flora endémica, a su vez, posee ecosistemas que varían de zonas glaciares, paramos, bosques andinos y bosque tropicales cálidos, que permite que la zona de estudio sea ampliamente biodiversa. Geológicamente, contiene un gran volumen de estructuras y geoformas que son de apoyo para entender la evolución geológica de la cuenca, esto sumado a las actividades humanas en ella, como el ecoturismo y turismo en la región, la participación de las comunidades indígenas que habitan en ella convierte la zona de estudio un alto potencial de geositios que alimentan el patrimonio geológico del país, idóneas para su geoconservación y preservación.

## Referencias:

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*, 51, 47–59.

Benito-Calvo, A., Perez-Gonzalez, A., Magri, O., Mesa, P., 2009. Assessing regional geodiversity: the Iberian Peninsula. *Earth Surf. Process Landf.* 34, 1433–1445.

Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: A Review. *Geoheritage*, 8 (2), 119–134.

Brilha, J., Gray, M., Pereira, D. I., y Pereira, P. (2018). Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. *Environmental Science and Policy*, 86, 19-28.

Carcavilla, L., Lopez-Martinez, J., & Duran, J. (2007). Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos.

Cárdenas, I y Restrepo, C. 2006. Patrimonio geológico y patrimonio minero en la Cuenca Carbonífera del Suroeste Antioqueño. *Revista Boletín Ciencias de la Tierra*. N°. 18, pp. 91-102.

Cardona, A., Jaramillo, C., Ojeda, G., Ruíz, J., Valencia, C. y Weber, M. 2007, en prep. Provenance and Tectonomagmatic Setting of the Santa Marta Schists, Northern Colombia Caribbean Intra-Oceanic Domains to the Continental Margin.

Castaño, U.C. 1991. Oasis de niebla, en: Uribe (ed). *Bosques de niebla de Colombia*, Banco de Occidente, Colombia, 20-8.

Cediel F, (2018) Phanerozoic orogens of Northwestern South America: cordilleran-type orogens, taphrogenic tectonics and orogenic #oat. Springer, Cham, pp. 3–89

Cediel, F. e. (2019). *Geology and Tectonics of Northwestern South America*. (R. P. Fabio Cediel, Ed.) Medellín, Colombia: Springer.

Cediel, F., Shaw, R., & Caceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. En C. Bartolini, R. T. Buffler, & J. F. Blickwede (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics*, AAPG Memoir 79.

Christian, C.S., Stewart, G.A., 1952. Summary of general report on survey of Katherine-Darwin region, 1946. In: *Land Research Series 1*. CSIRO, Australia, pp. 24.

Colegial, J. D., Piscioti, G., Uribe, E., 2002. Metodología para la definición, evaluación y valoración del patrimonio geológico y su aplicación en la geomorfología glacial de Santander (municipio de Vetás). Vol. 24 Núm. 39 (2002): *Boletín de Geología*

Colmenares L, Zoback MD (2003) Stress field and seismotectonics of northern South America. *Geology* 31:721–724

Colmenares, F., Mesa, A. M., Roncancio, J., Arciniegas, E., Pedraza, P., Cardona, A., . . . Vargas, A. F. (2007). geología de las planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26,27, 33 y 34. proyecto: “evolución geohistórica de la sierra nevada de santa marta”. Bogotá D.C.

Corpocesar. (2009). Fase Prospectiva Formulación del Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la subcuenca hidrográfica del río Magiriaino, municipios de

Agustín Codazzi, La Paz y San Diego en el departamento del Cesar. Ejecutivo, Cesar, Valledupar.

Forte, J. P. (2014). Avaliação quantitativa da geodiversidade: desenvolvimento de instrumentos metodológicos com aplicação ao ordenamento do território.

Gansser, A. 1955. Contribución a la geología y petrografía de la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia, Suramérica). Traducido por Geol. Dpl. Fabio Cediél (1966). Inventario Minero Nacional (Zona III). Bucaramanga.

Gray, M., 2004. Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 434.

Gelvez-Chaparro, Jorge, Barajas-Rangel, Daniel, Herrera-Ruiz, Juliana, & Ríos-Reyes, Carlos Alberto. (2020). Introducción al Geopatrimonio kárstico del municipio de El Peñón (Santander), Colombia. Boletín de Geología, 42(2), 147-167. Epub May 28, 2020.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 15(3), 259–263.

Jaramillo Zapata, J. E., Caballero-Acosta, J. H., & Molina-Escobar, J. M. (2014). Patrimonio geológico y geodiversidad: bases para su definición en la zona andina de Colombia: caso Santafe de Antioquia. Boletín de Ciencias de La Tierra, (35), 53–65.

Kellogg JN, Bonini WE (1982) Subduction of the Caribbean Plate and basement uplifts in the overriding South American Plate. Tectonics 1:251–276.

Kozłowski, S., 2004. Geodiversity. The concept and scope of geodiversity. Przegląd Geologiczny 52 (8/2), 833–837.

IDEAM. (s.f.). Obtenido de Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/sierra-nevada-santa-marta>

IDEAM-MinAmbiente. (2006). Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/019679/SerraniadelosMotilones.pdf>

Minenergía. (2018). Decreto Número 1353 del 31 de Julio de 2018. Ministerio de Minas y Energía.

Molina, A. C., Cordani, U. G., & MacDonald, W. D. (2006). Tectonic correlations of pre-Mesozoic crust from the northern termination of the Colombian Andes, Caribbean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 337–354.

Najwer, A., Borysiak, J., Gudowicz, J., Mazurek, M., & Zwoliński, Z. (2016). Geodiversity and biodiversity of the postglacial landscape (Dębnica River catchment, Poland). *Quaestiones Geographicae*, 35(1), 5-28

Najwer, A., Zwoliński, Z., & Giardino, M. (2018). Methods for assessing geodiversity. In *Geoheritage*. Elsevier, 1, 27-52

Nieto, L. (2001). Geodiversidad: propuesta de una definición integradora.

Ollier, C.D., Lawrance, C.J., Webster, R., Beckett, P.H.T., 1969. The Land Systems of Uganda. M.E.X.E., Christchurch, UK234 (Report 959).

Ordóñez, o., Pimentel, M. y de Moraes, R. 1999. Granulitas de Los Mangos, un fragmento Grenvilliano en la parte oriental de la Sierra

Pereira, D. I., Pereira, P., Brilha, J., & Santos, L. (2013). Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): An innovative approach. *Environmental Management*, 52(3), 541–552.

Rosado-González, E.M., Artut. A.S., Palacio-Prieto, J.L., 2008. UNESCO Global Geoparks in Latin America and the Caribbean, and Their Contribution To Agenda 2030 Sustainable Development Goals. *Geoheritage*.

Sánchez-Botello, C., 2018. Geological occurrence of the ecce homo hill's cave, Chimichagua (Cesar), Colombia: an alternative for socio-economic development based on geotourism. *International Journal of Hydrology*. Volume 2 Issue 5.

Silva, J. P., Pereira, D. I., Aguiar, A. M., & Rodrigues, C. (2013). Geodiversity assessment of the Xingu drainage basin. *Journal of Maps*, 9(2), 254–262.

Tavera, M., Sierra, N., Errázuriz, C., Hermilin, M., (2016) Georutas o itinerarios geológicos: un modelo de geoturismo en el Complejo Volcánico Glaciar Ruiz-Tolima, Cordillera Central de Colombia.

Torres, H, Molina, J. M, 2012, Aproximación al patrimonio geológico y geodiversidad en Santafé de Antioquia, Olaya y Sopetrán, departamento de Antioquia, Colombia. *Revista Boletín Ciencias de la Tierra.*, Nro. 32, pp. 23-34. Medellín.

Tschanz, Ch., Jimeno, A., y Vesga, C. 1969. Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta Area (Colombia). Informe 1829. Ingeominas, Bogotá, 288 pp.

UNESCO (2015). 'UNESCO Global Geoparks contributing to the Sustainable Development Goals'.

UNESCO (2018). 'Geotourism, geoconservation, and geodiversity along the belt and road: A case study of Dunhuang UNESCO Global Geopark in China', Proceedings of the Geologists' Association, 130(2), pp. 232–241.