

**Cuantificación de la geodiversidad como estrategia de apropiación social: caso de estudio, Valle de Aburrá**

**Presentado por:**

**Luisa María Restrepo Marín V**

**Dirigido por:**

**María Isabel Marín Cerón, PhD**

**Departamento de Ciencias de la Tierra**

**Escuela de Ciencias**

**2020**

## **Prefacio**

El presente proyecto de grado se crea a partir de la hipótesis: El calculo de la geodiversidad a partir de parametros geológicos , climáticos y geomorfológicos, que permite identificar poligonos de geodiversidad como apoyo a la gestion integrada del patrimonio geologico con miras a la geoconservación. Se prueba que las herramientas de sistema de información geográfica (SIG) y el análisis estadístico son significativos para aplicar la metodología de cuantificación de la geodiversidad en el Valle de Aburrá (VA). Se muestra un nuevo enfoque para la cuantificación de la geodiversidad basado en la clasificación de factores geomorfométricos, climáticos y litológicos. Se produce un mapa municipal de geodiversidad con cada una de sus clases discretas, con el fin de resaltar la distribución de la geodiversidad dando como resultado una información relevante que podría usarse como base para diversos campos científicos; como el mapeo para los usos del suelo, evaluar el patrimonio geológico de un área determinada, la gestión y protección de recursos naturales y ambientales; así como designar áreas para la geo conservación . Este se complementó con un inventario de Puntos de interés geológico (PIG's), geomorfológico y arqueológico, para la generación de una serie de georutas como estrategia de divulgación científica multinivel, con miras a la gestión integral del patrimonio geológico en el VA.

Se presenta en forma de manuscrito para ser sometido al Boletín de Geología de la UIS, y se adjunta como material anexo: SIG, bases de datos asociados. Los resultados, se enmarcan dentro de la producción del semillero de investigación en Geología Regional y Geoquímica, en la línea de investigación en Patrimonio Geológico y Geo conservación, pertenecientes al grupo de Investigación en Geología Ambiental e Ing. Sísmica.

## **AGRADECIMIENTOS**

En la vida hay grandes momentos, que no serían nada importantes si no se vivieran junto a personas maravillosas que hacen posible magnificar dichos momentos. Y este es uno de ellos, donde la vida se llena de felicidad y satisfacción, gracias a este gran logro, donde se traducen todos los años de aprendizaje, esfuerzo y dedicación; encaminados a la formación de un trabajo de grado, el cual ha sido creado y desarrollado no solo por esta servidora, sino con la grata colaboración, guía y ayuda de mi asesora la Doctora María Isabel Marín Cerón, que no solo facilitó la realización de este trabajo, sino también su apoyo incondicional.

Igualmente, todo esto va inspirado en otras personas, que sin participar directamente; me impulsaron en todo este trayecto; estas personas a las cuales no me alcanzara la vida para agradecerles y retribuirles, todo lo que han hecho y compartido conmigo; Mi madre Gloria patricia Marín, gracias por tu esfuerzo, amor y apoyo incondicional. también a un gran amigo y colega Santiago Echeverri Castillo, gracias por hacer parte en este último esfuerzo en este largo trayecto recorrido, mi familia y amigos que me han impulsado y apoyado en toda mi etapa universitaria. Pero más que todo agradezco a Dios por darme sabiduría, paciencia, salud y ganas para llegar hasta el punto en donde estoy hoy. Nada habría sido posible sin su apoyo.

## Tabla de contenidos

<b>RESUMEN</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
<b>2. MARCO GEODINAMICO DEL VALLE DE ABURRÁ</b> .....	<b>9</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>10</b>
3.1. Conformación de Geodatabase y sitios de interés .....	<b>12</b>
3.2. Clasificación Morfométrica – Clasificación Hipsométrica .....	<b>13</b>
3.3. Clasificación Climática .....	<b>13</b>
3.4. Clasificación Geológica .....	<b>13</b>
3.5. Clasificación Geomorfológica .....	<b>14</b>
3.6. Clasificación Geodiversidad .....	<b>14</b>
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>15</b>
4.1 Reclasificación Geológica .....	<b>15</b>
4.2 Reclasificación Hipsométrica .....	<b>16</b>
4.3 Reclasificación Climática .....	<b>16</b>
4.4 Mapa final de Geodiversidad .....	<b>17</b>
4.6 Inventario de Puntos de Interés Geológico/Geomorfológico y Georutas .....	<b>19</b>
4.6.1 Corredor Palmas – Parque ARVI –Cerro Quitasol .....	<b>19</b>
4.6.2 Ruta Universitaria .....	<b>20</b>
4.6.3 Ruta del Río Medellín y sus Cerros Tutelares .....	<b>21</b>
4.6.4 Ruta de Occidente .....	<b>22</b>
<b>5. DISCUSIÓN</b> .....	<b>23</b>
5.1. Cuantificación de la Geodiversidad .....	<b>23</b>
5.2 Importancia de la clasificación Geomorfológica sobre la Hipsométrica .....	<b>26</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>27</b>
<b>7. REFERENCIAS</b> .....	<b>28</b>

# **Cuantificación de la geodiversidad como estrategia de apropiación social: caso de estudio, Valle de Aburrá**

**Luisa María Restrepo Marín<sup>1</sup>; María Isabel Marín Cerón<sup>2</sup>**

[lrestr64@eafit.edu.co](mailto:lrestr64@eafit.edu.co)<sup>1</sup>; [mmarinice@eafit.edu.co](mailto:mmarinice@eafit.edu.co)<sup>2</sup>

## **RESUMEN**

Un nuevo enfoque para la cuantificación de la geodiversidad basado en la clasificación de factores geomorfométricos, climáticos y litológicos. El conjunto de datos espaciales mencionados, se combinan usando un procedimiento de unión de superposición, produciendo un mapa municipal de la geodiversidad del Valle de Aburrá con cada una de sus clases discretas, con el fin de resaltar la distribución de estas clases que nuestro valle presenta, haciendo un inventario de Puntos de interés Geológico (PIG's), Geomorfológico y arqueológico, para la generación de una georuta como estrategia de divulgación científica multi-nivel, con miras a la gestión integral del patrimonio geológico del Valle de Aburrá (VA).

**Palabras clave:** Valle de Aburrá, geodiversidad, geomorfométricos, georuta, multi-Nivel, patrimonio geológico.

## **Quantification of geodiversity as a social appropriation strategy: case study, Aburra Valley**

## **ABSTRACT**

A new approach for the quantification of geodiversity based on the classification of geomorphometric, climatic and lithological factors. The aforementioned spatial data set is combined by means of a superposition union procedure, producing a regional geodiversity map of the Aburrá Valley with each of its discrete classes, in order to highlight the distribution of the classes that our valley presents through conducting an inventory of Geology, Geomorphology and Points of Archaeological Interest (PIG's), for the generation of a georoute as a multilevel scientific dissemination strategy, with a view to the integral management of the geological heritage of the Aburrá Valley.

**Keywords:** Aburra Valley, geodiversity, geomorphometric, georute, multi-Level, geological Heritage.

## 1. INTRODUCCIÓN

La apariencia del paisaje es un concepto que no solo está influenciado por factores físicos y biológicos, sino también por la percepción subjetiva del observador (Benito *et al*; 2019), estos influyen en la descripción de la topografía local, generando información geomorfométrica de la tierra, proporcionando un conocimiento sobre los procesos que intervinieron en la forma de los paisajes (Benito-Calvo *et al.*, 2009). Todos estos factores hacen alusión a uno de los componentes más importantes a lo que llamamos patrimonio. La definición habitual de 'patrimonio' hace referencia a los elementos que han sido heredados a través del tiempo. Pero en la actualidad la geo conservación se practica a los procesos geomorfológicos o geológicos, a la topografía, los sedimentos recientemente formados, a los suelos, entre otros. Por lo tanto, 'geo patrimonio' es un término apropiado para aplicar a estas características modernas, así como a otras más antiguas que han sobrevivido hasta el día de hoy (Gray, 2018).

Por ejemplo, Jedicke (2001) define la geodiversidad como la variabilidad en los elementos y componentes abióticos de un sistema ecológico jerárquico, como lo es la geología, la topografía, las condiciones climáticas y la cobertura del suelo. Siendo esta relación entre geodiversidad y patrimonio geológico una variación de un McKelvey Box tradicional (Gray, 2018), es decir una forma de representar visualmente la disponibilidad de recursos minerales particulares en función del valor económico de su producción y la probabilidad geológica de su presencia (Benito-Calvo *et al.*, 2009). De este modo, la biodiversidad se determina principalmente sobre la base del análisis y evaluación de las características abióticas del área de estudio, es decir, los tipos de cobertura, el uso de la tierra, pero complementados por tipos de vegetación real y potencial, siendo una determinación no directa de la diversidad de especies, sino una referencia al impacto de la geodiversidad en la biodiversidad (Gray, 2018).

En la década de los años 90 (Duff, 1994), definió la geodiversidad como la variabilidad abiótica, sosteniendo que ciertos elementos del sustrato geológico se reflejan en la riqueza

y la diversidad de especies de plantas en un área investigativa determinada. Es por ello que la preparación de un buen plan paisajístico - ecológico requiere tener en cuenta las reservas naturales existentes. Esta condición solo puede cumplirse reconociendo los valores naturales del área, evaluando no solo su diversidad abiótica sino también la biótica (Gray, 2018). Evidentemente, el concepto de geodiversidad ha sido ampliamente discutido, pero lastimosamente hay pocas publicaciones sobre la cuantificación de la geodiversidad (Bruschi, 2007; Benito-Calvo *et al.*, 2009; Gray, 2018).

Trabajos llevados a cabo desde mediados del siglo pasado, tuvieron en cuenta el concepto de clasificación de la geodiversidad en el desarrollo de la cartografía de los sistemas terrestres (Christian y Stewart, 1952) o en el análisis de los parámetros del paisaje (Conacher y Dalrymple, 1977). Solo hasta el 2000 se dio un resurgimiento de la investigación en temas de geodiversidad y ya hacia la última década asociado a las mejoras de la funcionalidad de la computación y el software, se consolida la geoinformática como una herramienta útil para la gestión de recursos naturales, recursos humanos y riesgos naturales (p.e. Serrano y Flaño, 2007; Benito-Calvo *et al.*, 2009; Gray, 2018). Autores como Ratajczak-Szczerba (2013), sostienen que “la biodiversidad suele ser una especie de escaparate y uno de los elementos utilizados en la promoción turística”. Por el contrario, las actividades humanas ciertamente están destruyendo, dañando o contaminando la geodiversidad antes de que pueda ser estudiada y descrita. Estas amenazas engloban la extracción de minerales, expansión urbana, desarrollo de tierras, ingeniería, el manejo de ríos y costas, las actividades forestales, agricultura, recreación, turismo, recolección geológica (Gray, 2018). En relación a la problemática expuesta se procedió a hacer una combinación de información geológica, geomorfológica y climática, utilizando enfoques geoinformáticos, siendo útil para la cuantificación de la geodiversidad a escala municipal (Benito-Calvo *et al.*, 2009).

La clasificación, cuantificación y mapeo de factores geológicos, geomorfológicos y climáticos, permite un acercamiento sistémico al territorio, que permite a su vez entender los procesos que han controlado la evolución del paisaje, es por esto que a partir de un mapa de geodiversidad se calcula la diversidad del paisaje y otros índices de patrones espaciales (Gray, 2018). Esta metodología puede ser útil para la toma de decisiones a la hora de evaluar el patrimonio geológico, planificación de los recursos naturales o para designar áreas para la conservación (Gray, 2013). Con ello, se ratifica el papel de la

geología a una escala multinivel en la sociedad, pensando en la vocación dada por la maravilla de los paisajes y la compleja historia que ha modelado la tierra (Tavera *et al.*, 2017), buscando así atraer al público y generar un beneficio socioeconómico, enfocado en la creación de una infraestructura turística de apoyo a algunos elementos del patrimonio geológico presentes en la región (Carcavilla *et al.*, 2011) fomentando a su vez, mecanismos de divulgación y educación.

En el caso específico del VA, un valle intra-montano rodeado por altiplanos y escarpes regionales, con variabilidad climática global y local que ha determinado la generación de múltiples etapas de deslizamientos y avenidas torrenciales desde hace al menos 3 Ma (Rendón, 2003), un lugar donde la historia geológica permite armar un rompecabezas aún inconcluso de la formación y disgregación del supercontinente Pangea (Vinasco *et al.*, 2003) y la orogenia Andina. Adicionalmente, es un territorio en el cual coexiste el paisaje, con lo académico para la gestión patrimonial in-situ y ex-situ, se convierte en un laboratorio ideal para la cuantificación de la geodiversidad con el fin de describir la heterogeneidad abiótica como una herramienta para la gestión integral del patrimonio geológico.

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo principal la generación del mapa de geodiversidad del área metropolitana del Valle de Aburrá, a partir de la información geomorfométrica, geológica y climática, como una herramienta hacia la gestión integrada del patrimonio geológico, adoptando la metodología de Benito-Calvo *et al.* (2009), modificada parcialmente para adaptarse a las necesidades de este trabajo. De acuerdo con los razonamientos que se han venido analizando, el geoturismo está directamente relacionado con la geodiversidad, y se convierte en un componente importante que está directamente relacionado con la ejecución de materiales de apoyo explicativo-didáctico, que permitan a los visitantes conocer las características geológicas, bióticas y abióticas del lugar (Carcavilla *et al.*, 2011), para generar una mayor apropiación del patrimonio geológico y de valoración del paisaje en Colombia (Tavera *et al.*, 2017).

Finalmente, como ya ha sido ampliamente explorado por diversos autores (p.e. Medina y Monge Ganunzas (2012), Morales Miranda (1998), Page (1992)), la divulgación y promoción turística puede favorecer la sostenibilidad para así mejorar el conocimiento de la ciencia en la educación ciudadana. Consolidándose como una estrategia de divulgación

científica multinivel para la gestión integrada del patrimonio geológico de la región. Por todo lo anterior, el presente proyecto pretende, crear elementos interdisciplinarios como el estudio cuantitativo de la geodiversidad que posee el valle, un mapa de lugares de interés geológico (PIG's), que permita resaltar lugares de alto interés geológico y turístico y junto con este el diseño de un infográfico que de una visión de los conocimientos en las ciencias de la tierra a través de un lenguaje geológico elemental y visual de mayor entendimiento en las personas, y comprender y transmitir los conceptos fundamentales que controlan la dinámica de la tierra, tomando decisiones responsables de gran interés (Carcavilla *et al.*, 2011).

## **2. MARCO GEODINAMICO DEL VALLE DE ABURRÁ**

El valle de Aburrá (VA) se encuentra ubicado en el extremo norte de la cordillera central de los Andes colombianos, y ha sido excavado en la “Meseta Antioqueña”, una superficie erosiva de una gran elevación con 5000 km<sup>2</sup> de extensión y una elevación media de 2500 metros sobre el nivel del mar. La elevación del fondo del VA está a aproximadamente 1000 m por debajo de la altitud media de la meseta (Henaó y Monsalve, 2018), ubicado en el extremo norte de la cordillera Central de los Andes colombianos, siendo dividido por tres amplios sectores geomorfológicos. La parte central consta de llanuras aluviales delimitadas por pendientes moderadas a suaves; mientras que estrechos valles asimétricos delimitados por empinadas laderas toman toda las partes norte y sur. Características de erosión más antiguas conocidas como Santa Elena con 2750 msnm, y las superficies de tierra de San Pedro con unos 2800 Msnm (Aristizábal *et al.*, 2005). Es una región que ha sido tectónicamente activa durante millones de años (GSM, 2002; Rendón, 2003). Las tendencias estructurales que intervinieron con la evolución tectónica del Valle están representadas por el sistema de fallas Cauca- Romeral, con evidencia regional de desplazamiento lateral derecho e izquierdo (Ego y Sebrier, 1995).

El VA presenta un entorno geológico y geomorfológico de cinco unidades geológicas complejas: el basamento metamórfico paleozoico; las rocas ígneas ultrabásicas; una secuencia volcánico-sedimentaria; cuerpos granitoides intrusivos; y depósitos de laderas y sedimentos aluviales (Maya y Gonzales, 1995). El basamento metamórfico que conforma el valle este compuesto por anfibolitas y gneis, que afloran en el norte, oeste y

sureste. Dunitas, gabros, basaltos y sedimentos de origen oceánico, fuertemente tectonizados, fueron arrojados sobre el basamento metamórfico durante el Cretácico (Restrepo y Toussaint, 1984). Cuerpos alargados de estas rocas orientadas NW-SE afloran en las partes suroeste y central del Valle de Aburrá. Los cuerpos plutónicos ácidos a intermedios del Triásico y Cretácico invaden el cinturón metamórfico (McCourt *et al.*, 1984) aflorando en el norte y el oeste, como se muestra en la Figura 1 y 2. Según Arias (1996) “la respuesta a los procesos de levantamiento tectónico se manifiesta en una gama morfológicamente compleja, de procesos de erosión y disección. Dejando las superficies de erosión con un relieve suave y simple que dan paso a diferentes expresiones superficiales de erosión degradadas” (Ingeominas, 2005). Desde la década del 70, con motivo de los proyectos hidroeléctricos en la zona del oriente antioqueño, se hicieron los estudios geomorfológicos para evaluar los procesos que intervienen en la conformación del paisaje; llegaron a la conclusión de que éste está regido por la formación de planicies que responden a las etapas de levantamiento de la Cordillera Central desde el Mioceno – Pleistoceno (Ingeominas, 2005). Se conocen múltiples trabajos geomorfológicos sobre el origen y evolución del Valle de Aburrá: Scheibe (1919), Posada (1936), Botero (1963). La discusión de estos autores se centra en si el Valle se originó por procesos erosivos, tectónicos o si se debe al desagüe de un antiguo lago.

### 3. METODOLOGÍA

Para realizar una estimación cuantitativa de la geodiversidad se partió de una clasificación inicial del terreno para identificar la heterogeneidad física de la topografía del VA. Esta clasificación se elaboró utilizando técnicas SIG (ArcGIS 10.5) e involucró clasificaciones morfométricas, geológicas y morfoclimáticas. El diagrama de flujo de este procedimiento se muestra en la figura 3 a continuación.

**El mapa dem clasificado** se generó aplicando técnicas de clasificación estadística a un modelo multicapa (Benito *et. al* 2019), el cual se compuso de variables morfométricas obtenidas del DEM (fuente: Microzonificación del valle de Aburrá, AMVA). Utilizando este modelo digital de elevación (DEM) con una resolución espacial de 2 metros (proyección MAGNA\_Transverse\_Mercator), se seleccionaron las principales variables morfométricas: curvatura tangencial, pendiente, rugosidad y relieve relativo.

**La clasificación geológica** se obtuvo del mapa geológico del VA a escala 1:10.000, elaborado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). Este mapa se simplificó, es decir, se reclasificó en 5 clases, considerando las clases geológicas, asignándole valores de 1 a 5 según su importancia geológica, teniendo en cuenta los tipos de rocas y sus edades, y que tan alterado por el hombre. Estos fueron clasificados según los papers base, los cuales se basaron en el análisis herurístico ó criterio del experto para dar cierta validez al estudio, con base a esto se decidió un criterio de enfoque para asignar un nivel de importancia a lo evaluado, ganando objetividad asignándole un criterio direccionado a un objetivo propuesto como es el caso. Luego por medio de la herramienta “Polygon to ráster” y los atributos de clasificación dados, se convirtió a un mapa ráster.

Para hacer la **clasificación de las regiones morfoclimáticas del Valle**, se determinaron según las zonas de vida de Holdrige, con base en la temperatura media anual y precipitación acumulada, considerando también la estacionalidad. Los datos climáticos usados en esta en esta clasificación corresponden a las superficies de precipitación y temperatura de la base de datos WorldClim (<http://www.worldclim.org>).

Las medidas de geodiversidad se calcularon a partir de los 3 rasters reclasificados (morfoclimático, geológico, morfométrico) siguiendo la metodología de Benito-Calvo *et al.*, 2009), se usó la herramienta algebra de mapas y así la suma de las diferentes capas de ráster. De esta forma, se desarrolló una clasificación de terrenos, que constituye un modelo para la geodiversidad del VA, basado en las propiedades morfométricas, climáticas y geológicas (Schaetzl y Anderson, 2006).

Como una herramienta adicional a las tres clasificaciones (morfométrica, geológica y morfoclimática), en el presente estudio se utilizó el mapa de **clasificación geomorfológica** (obtenido a partir del mapa geomorfológico del VA a escala 1:10.000, AMVA), a partir de las unidades macro y micro como venían definidas en la tabla de atributos. Una vez simplificado y reclasificado, se reemplazó el mapa morfométrico por el geomorfológico con el fin de comparar los mapas de geodiversidad obtenidos y establecer así la conveniencia de usar un mapa morfométrico o geomorfológico a escalas detalladas de cuantificación.

### 3.1. Conformación de Geodatabase y sitios de interés

La cartografía empleada para la cuantificación de la geodiversidad del VA se basó en la información base suministrada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), proveniente de los archivos almacenados en la GeoDatabase Ambiental de dicha institución, esta contiene la base geológica, geomorfología, curvas de nivel, entre otras variables, que fueron empleados para generar los diferentes mapas de este estudio. También un modelo digital de terreno (DEM) con una resolución espacial de 2x2, junto con la cartografía digital empleada a escala 1:10.000, con base a toda esta información recopilada y adquirida por las distintas fuentes anteriormente descritas se dispuso a hacer uso de estas para la generación de mapas y datos que se verán en este trabajo.

Se dispuso a recopilar varios sitios de interés dentro de la zona de estudio, en este caso el VA donde se pretende con este proyecto resaltar diferentes sitios los cuales presenten una diversidad biótica, abiótica; sin dejar atrás que contengan un alto interés geológico, es decir, sitios que normalmente se frecuentan como “sitios turísticos” pero verlos desde un ámbito más geológico con la intención de resaltarlos y hacerlos parte de una georuta en el valle de aburra, que contenga todas las componentes para hacerlo parte de rutas geológicas turistas, donde se integre la ciencia con el turismo (figura 4).

Hasta el momento 15 PIG's (Puntos de interés geológico) fueron priorizados, como material base para la generación de una georuta en el Valle de Aburrá, consolidándose como una estrategia de divulgación científica multi-nivel para la gestión integrada del patrimonio geológico de la región. Entre ellas tenemos la georuta realizada en el trabajo de Del castillo (2018) sobre el Paque Arví y la georuta Al campus de EAFIT dirigida por la doctora María Isabel Marín Cerón.

Marín-Cerón., *et al* (2020), en esta última se hace la exploración del campus universitario, mediante la observación de cinco geo-arqueo sitios, los cuales permiten la identificación de materiales geológicos de origen natural expuestos de forma ex-sitú en plazoletas, pisos, museos, etc. (ver figura 4). y algunos otros puntos descritos por mi persona Luisa María Restrepo junto mi asesora Maria Isabel Marín, los cuales estarán descritos en el transcurso de este trabajo.

### **3.2. Clasificación Morfométrica – Clasificación Hipsométrica**

La clasificación morfométrica se planteó utilizando un modelo multicapa compuesto por elevación, pendiente, curvatura tangencial y rugosidad, que se derivaron del DEM. Por medio del software ArcGIS 10.5, se obtuvo la pendiente, el relieve relativo, la rugosidad y la curvatura tangencial, estimando la rugosidad a partir de la herramienta “estadísticas de bloque”, método que se basa en calcular el rango (diferencia entre los valores mayor e inferior) de las celdas en la vecindad, tal proceso se explica en la Figura 5. Finalizando este proceso se llegó al fin de usar el DEM 2x2 con una reclasificación por natural breaks, seleccionando la zona de estudio, en este caso todo el valle y así plantear y usar para superponer los mapas con el DEM en vez de la clasificación anteriormente descrita.

### **3.3. Clasificación Climática**

Las variaciones de elevación provocan una variedad de condiciones climáticas en el VA. Usando la clasificación propuesta por Holdridge (1967) y las superficies climáticas de la base de datos WorldClim (<http://www.worldclim.org>), A partir de este se clasifica según las zonas de vida de holdrige (figura 7) según su temperatura y precipitación define las regiones morfoclimáticas, generando zonas climáticas (tabla 1) tales como húmedo montano bajo (bh-MB), muy húmedo montano bajo (bmh-MB), muy húmedo premontano (bmh-PM) (Holdridge,1967). Las variaciones de latitud y elevación provocan una variedad de condiciones climáticas en el Valle de Aburrá. Usando la clasificación propuesta por Holdridge (1967) y las superficies climáticas de la base de datos WorldClim, como precipitación y temperatura, siguiente a eso el procesamiento de la información mediante la herramienta de algebra de mapas de ArcGIS, donde se recopilaron los datos descargados mes a mes de temperatura y precipitación con el fin de conocer la temperatura media y la precipitación acumulada del área de estudio (figura 8). Debido a esto se pueden definir dos regiones morfogenéticas o zonas de vida de holdrige en el Valle: Bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) y Bosque muy húmedo premontano (bmh-PM).

### **3.4. Clasificación Geológica**

Siguiendo la metodología de construcción del mapa geológico como lo muestra la figura 9 para incluir las propiedades litológicas, cronológicas y estructurales en la clasificación de la geodiversidad se utilizó el Mapa Geológico del VA. Este mapa está compuesto por 30 unidades geológicas que se extienden desde el Precámbrico hasta el Cuaternario (Figura 10), e incluye las principales estructuras tectónicas. Debido al enfoque regional y la escala de este trabajo, hemos simplificado este mapa utilizando su importancia geológica, como lo es el tipo de roca (sedimentarias, metamórficas e ígneas) junto con sus edades generales combinadas (Cuaternario, Terciario, Mesozoico, Paleozoico y Precámbrico) y que tan alteradas por el hombre y con base a esto se realizó una tabla de clasificación (tabla 2) para llegar al mapa clasificado (Figura 14).

### **3.5. Clasificación Geomorfológica**

Para llegar a la clasificación geomorfológica se desarrolló la metodología descrita en la figura 11. La clasificación se obtuvo del mapa geológico del VA a escala 1:10.000, para así incluir las macro unidades y micro unidades del valle de aburra. Desplegando estas 37 unidades geomorfológicas (figura 12). Con base a estas se simplificó, es decir, se reclasificó en 5 clases, considerando su importancia en cuanto a geoformas, como resaltaban en el paisaje del valle y la importancia dentro del mismo paisaje sin dejar atrás la historia detrás de esta (tabla 3). Llevando a cabo una asignación de valores tales como 1- no importante; 2- medianamente importante; 3- importante; 4-significativamente importante, y 5- muy importante.

### **3.6. Clasificación Geodiversidad**

Una vez elaborados los mapas morfométrico, climático y geológico, el último paso consistió en combinar estos tres conjuntos de datos espaciales, mediante álgebra de mapas superpuesta como lo muestra la metodología en la figura 13. De esta operación obtuvimos un mapa del VA, en el cual se resalta la geodiversidad en escala de valores tales como 1- no importante; 2- medianamente importante; 3- importante; 4-significativamente importante, y 5- muy importante. Finalmente, los Polígonos de área urbana y un buffer de 30 metros a lo largo del eje del río Medellín se superpuso al mapa final.

## **4. RESULTADOS**

Este estudio ha evaluado la geodiversidad del VA cuantificando sus características del terreno, con base en información geomorfológica, geológica y climática. La metodología siguió el enfoque de Benito-Calvo *et al.*, (2009), con algunas modificaciones, en particular. Los datos espaciales y de literatura recopilados, tanto analógicos como digitales, permitieron evaluar la diversidad geográfica del Valle. Se obtuvieron un total de 6 mapas de factores, es decir, 4 mapas para la diversidad de elementos abióticos que se convirtieron en la base para la creación de la geodiversidad total del paisaje del valle.

### **4.1 Reclasificación Geológica**

En el mapa geológico resultante clasificado (figura 14) con valores de 1 a 5 según su orden de importancia e información geológica; se les asignó una valoración siendo 1- Muy baja, 2- Baja, 3- Media, 4- Alta, 5- Muy alta. Se logra evidenciar el cómo la geodiversidad con base a la litología resalta más las clases 1, 2 y 3 con un porcentaje del área de aproximadamente 65% y que las clases 4 y 5 son mucho más específicas y pequeñas, pero esto nos deja saber que solo cierta parte del área metropolitana es de alto interés con base a la clasificación realizada.

Se puede decir que esta clasificación nos da la razón, en cuanto a que las unidades litológicas están cubiertas por formaciones superficiales, bien sea asociadas con suelos derivados del perfil de meteorización o por depósitos de origen aluvial, aluvio-torrencial y de vertiente, que rellenan el valle, por ende, muchos de los parches están categorizados con bajo valor. Estos depósitos asociados al río Medellín de gran espesor, que puede alcanzar hasta los 100 m de profundidad (AMVA, 2016).

Adicionalmente, los parches que resaltan de tonalidad roja y amarilla con clasificación 5 y 4, en orden de importancia dan lugar a zonas donde la altura juega un papel importante, ya que esto indica mejor preservación de la roca en cuestión y lo poco afectado por el hombre, por ende presenta una geodiversidad alta a la hora de ser clasificado, y en ello podemos observar que ciertos parches se encuentran situados zonas de alto interés

geológico en este trabajo, como lo son el Cerro Quitasol en Bello, El Cerro Nutibara, El Cerro el volador, El Cerro de San Miguel. Lo que nos indica que el estudio va por un buen camino a la hora de analizar la geodiversidad con base a la geología.

## **4.2 Reclasificación Hipsométrica**

El mapa seleccionado para hacer parte de la unión junto con las dos variables ( geológico y climático) los índices usados se derivaron después de la evaluación previa de la baja interdependencia de varios derivados del DEM, con base a estos se propuso una clasificación por natural breaks donde se considera la altura y pendiente, y se clasifico en 5 clases (figura 15) según las variables anteriormente mencionadas ( altura, pendientes); La amplitud del relieve es la diferencia máxima en elevación dentro del área del VA, los cuales se le asignaron valores de 1- Muy baja, 2- Baja, 3- Media, 4- Alta, 5- Muy alta geodiversidad; Se destacan los parches de menor valor de geodiversidad como lo hemos venido trabajando, son zonas de baja altura, las cuales han sido altamente alteradas o modificadas por el hombre, por su baja altitud y han sido usadas para el asentamiento de población y/o explotación generando depósitos antrópicos de bajo valor en este estudio. Las clases 1, 2 y 3 enfocadas en la zona central del valle donde se extiende toda la cuenca del río Medellín, esto nos da la razón ya que a sus alrededores tenemos todos estos depósitos aluviales y aluvio-torrenciales que no tienen alto valor a lo que geodiversidad respecta. Sin embargo, tenemos algunos parches con clasificación 4 y 5 donde resaltan las ubicaciones de algunos cerros importantes y dominantes en el paisaje de los diferentes municipios que componen el valle; entre ellos están el Cerro de San Felix, El Cerro del Padre Amaya, El Cerro Nutibara, El Cerro de las tres cruces y El Cerro el volador. Dejándonos claro que realmente el mayor contraste lo reflejan estas imponentes elevaciones en comparación con otros parches.

## **4.3 Reclasificación Climática**

Dadas las condiciones climáticas tan variables en el VA y las formaciones vegetales que allí se presentan, se establecieron diferentes zonas de vida definidas por Holdridge (1967) son un grupo de asociaciones vegetales dentro de una división natural del clima, las

cuales, tomando en cuenta las asociaciones edáficas y las etapas de sucesión, tienen una fisonomía similar en cualquier parte del mundo.

El VA presenta las zonas de vida de Bosque muy Húmedo Premontano (bmh-PM) conocido como bosque subandino o premontano, tiene como límites climáticos una temperatura media aproximada entre 18 y 24°C y un promedio anual de lluvias de 2.000 a 4.000 mm (AMVA, 2016). Y en otro orden se tuvo el bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) conocidos como bosques andinos ó montano bajo, con una temperatura media entre 12 y 18 °C, con un promedio anual de lluvias de 2000 a 4000 mm, se halla en elevaciones comprendidas entre 2000 y 3000 m.s.n.m. (Corantioquia, 2004). La clasificación según la precipitación y temperatura, junto al parámetro de altura, permitió establecer dos zonas de vida. Finalmente, las zonas obtenidas fueron reclasificadas con valores de: 5 para el bosque muy húmedo Montano bajo (bmh-MB), representando menos del 30 al 25% del área total del territorio del valle de Aburrá (figura 16). Y un valor de 4 al bosque muy húmedo pre montano ( bmh- PM) que abarca el 65 al 70% aproximadamente del área metropolitana. Estos valores ya establecidos dieron lugar a que solo una pequeña área que acoge el bmh-MB presenta alta geodiversidad climática las zonas.

#### **4.4 Mapa final de Geodiversidad**

Al juntar todas las componentes anteriormente descritas (geología, geomorfología y clima) se obtiene nuestro mapa de geodiversidad sumando los diferentes factores (figura 18), el mapa de diversidad geológica, el cual se basó en la asignación de valores cualitativos discretos como resultado de la agregación de 5 clases clasificados en forma de parches están claramente indicados en el diseño del mapa (Fig.14). Más de la mitad del área de estudio se clasificó litológicamente como moderadamente diversa, resaltando los parches con clasificación de 3 a 5. Incluye principalmente un amplio valle del río Medellín, la mayor parte de la cuenca está ocupada por áreas de media y moderada variedad litológica. Más del 68% del área de influencia muestra una diversidad muy baja y baja. Por contrario, las diferencias de valoración alta (clases 4 y 5) en alturas relativas comprenden alrededor del 15% del área. Estos son principalmente los cerros, y bordes de las laderas elevadas del valle (Fig. 15). Y por último tenemos el mapa morfoclimático

(Fig. 16), es un mapa de datos continuos. Su variedad no es muy amplia. El mayor porcentaje del área lo abarca la zona clasificada como bosque muy húmedo pre montano (bmh-PM), seguido de la zona de bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) que abarca un rango menor.

La mayor parte del valle está dominado por llenos antrópicos y flujos de escombros como se describe anteriormente (Fig. 17) ya que los flujos de escombros han modelado el fondo del valle y le han dado un modelado al frente de las laderas. Posteriormente los llenos antrópicos y el movimiento de tierras por el acelerado proceso urbanístico, hace que geológicamente estas zonas de clases 1, 2 y 3 no sean de alto interés en cuanto a geodiversidad se trata, ya que han sido modificados, alterados y por estar en un régimen de alturas bajo son más susceptibles a construcción, reducción de coberturas vegetales y daño en la riqueza de suelo. Ahora bien, las zonas altas que se resaltan en tonalidades rojas y anaranjadas (clase 4 y 5) se enmarca un porcentaje menor del área de estudio pero que cumplen con el estándar de geodiversidad ya que son las menos intervenidas por acciones humanas y disponen de una mayor riqueza en cuanto a vegetación, flora, fauna, litología y altura.

Comparando el mapa anterior con el mapa realizado a partir de la clasificación geomorfológica, se observa un aumento en las zonas con alta geodiversidad (tonalidades rojas y anaranjadas con valores de 4 y 5), asociadas a las laderas correspondientes al valle medio y superior del valle de Aburrá. También se refleja los valores más bajos (1 a 3) hacia el fondo del valle, siendo la zona más intervenida antrópicamente. Otra variación importante, se nota hacia la zona norte del valle, dominado por 2 unidades: Valle Hatillo Barbosa y bloque Matasanos, zona rural que presentan alta geodiversidad pues es una zona que denota una no tan exagerada expansión urbana (con una valoración de 4). Su geodiversidad está marcada por su clara relación genética con el actual sistema de drenaje lo cual denota una edad relativamente reciente, poco modificada. La parte media superior y baja del valle, donde no solo se encuentran las zonas con mayor contraste geomorfológico, se encuentran dentro del área de protección (Parque Arví), esta zona, tiene gran cantidad de PIG's como se describió en la anterior tabla 3.

## **4.5 Inventario de Puntos de Interés Geológico/Geomorfológico y Georutas**

Se identificaron 33 Puntos de Interés Geológico/Geomorfológico dentro del VA (Tabla 4), distribuidos en el corredor Palmas - Parque Arvi (Del Castillo, 2019) - Guarne. Ruta Universitaria: Al Campus Georuta en EAFIT (Marín-Cerón, 2020), UNAL-MED, UdeA – Explora, Planetario. Ruta del Río Medellín en Metro como eje estructurante que incluye Parques del río, Cerro Nutibara, Parque de los pies descalzos, Museo del Agua y Cerro el Volador. Ruta de Occidente que inicia en la facultad de Minas (Universidad Nacional-Sede Robledo), Vía San Pedro, Antigua vía a Santafé de Antioquia, Puente de Occidente y Cerro de las Tres Cruces.

Como forma de divulgación científica, se propuso un infográfico sobre la evolución del valle de Aburrá basado en el artículo de Rendon (2003). Donde no solo se aprecia el cambio que ha tenido el valle hasta ahora, sino los lugares de interés geológico que se aprecia en este “Modelado del paisaje del valle” que se han venido desarrollando dentro de este. Para entender el infográfico se recomienda visitar los PIG’s como lo son: El mirador de las palmas, El cerro de San Felix, Parque Arví, Cerro de las tres cruces y el alto de la Virgen (Figura 21).

### **4.6.1 Corredor Palmas – Parque ARVI –Cerro Quitasol**

El corredor vía Palmas, altiplano de Santa Elena – Piedras blancas, permite hacer un recorrido hacia los complejos procesos tectónicos que se dieron en la Cordillera Central, desde el Paleozoico hasta el presente. Relicto de relictos de roca que cuentan la historia de Pangea en el límite del Permo-Tríasico (Afloramientos en la vía Palmas, restaurante Doña Rosa) y su posterior disgregación (afloramientos a la altura de la Colegiatura), son únicos por su preservación, valor escénico y científico. Adicionalmente, los miradores existentes en esta vía permiten la visualización del VA, donde se alcanzan a divisar los cerros tutelares anteriormente mencionados, el fondo del Valle, y las laderas con sus múltiples procesos que dejan huellas de antiguos deslizamientos, asociados a la evaluación del VA desde hace más de 3 Ma (Marín, M., comunicación verbal). La llegada al Alto de Las Palmas y el acceso al paisaje colinado del oriente Antioqueño, conecta con el Parque ARVI, donde los procesos tectónico-erosivos que han modelado su paisaje

desde finales del Cretácico (Restrepo-Moreno et al, 2010) y desde el Mioceno (Rendón, 2003), reflejando en la geomorfología que compone el Parque Arví. El trabajo realizado por Del Castillo (2019), hace la compilación de puntos de interés geológico, geomorfológico, minero y arqueológico, conformado por 19 geo-arqueositos potenciales del Parque Arví. Descendiendo del Parque Arví se puede hacer por dos vía: Santa Elena, donde se aprecia la mejor exposición de la unidad anfibolitas de Medellín, una unidad clásica donde se pueden apreciar las diferentes zonas del metamorfismo Barroviano en protolitos pelíticos, afloramientos también muy bien conservados se observan en la vía Medellín-Bogotá, donde adicionalmente se observa la panorámica del Valle de Aburrá en su porción más Norte y la cantera que suplente a la ciudad de Medellín de material triturado proveniente de la Dunita de Medellín.

#### **4.6.2 Ruta Universitaria**

Al Campus Georuta, es una ruta geológica que consta de 5 estaciones de distintos lugares dentro del campus, los cuales contrastan un alto contenido histórico, cultural y patrimonial, entre los cuales se encuentra: (1) Sitio arqueológico multi-componente en el sector de los Guayabos; (2) un piso con más de 1400 Ma de historia (Biblioteca Diego Echavarría); (3) Parque de los pimientos, bloque de roca caliza que cuentan la historia de la invasiones marinas en el Cenozoico; (4) Terraza del bloque 37 una panorámica hacia el Valle de Aburrá; (5) Parque de la geología, rocas que cuentan la historia de los Andes Colombinos (Marín-Cerón, 2020).

Saliendo de la Universidad EAFIT en Metro se puede ir directo hasta la estación Universidad, donde se podrá encontrar la zona de divulgación de ciencia, tecnología y cultura más importante en el sector Norte de Medellín, esta incluye El Museo de la Universidad de Antioquia, el Parque Norte, el Parque Explora, el Parque de Los Deseos y el Planetario Jesús Emilio Ramírez, en este corredor se concentran colecciones: Artes Visuales, Ciencias Naturales, Historia de la Universidad, y Antropología, museos interactivos para la apropiación y divulgación de la ciencia salas Infantiles, auditorios, salas de exposiciones temporales y el acuario de agua dulce más grande de Latinoamérica (que recrea dos ecosistemas en riesgo: el bosque húmedo tropical y los arrecifes de coral); salas explicativas de los fenómenos del universo y un viaje por el cielo de Medellín y el sistema solar.

### **4.6.3 Ruta del Río Medellín y sus Cerros Tutelares**

Saenz (2016) define Parques del Río Medellín como un parque lineal localizado en la zona céntrica de la ciudad de Medellín, integrando ambas orillas del río, el cual atraviesa la ciudad de sur a norte. Esta obra integra y contempla el mejoramiento de la infraestructura, el paisajismo y la vegetación, con el fin de convertirse en un corredor de movilidad metropolitano, y un eje principal del espacio público y ambiental, favoreciendo el encuentro ciudadano (Alcaldía de Medellín, 2003). Siendo una estrategia de desarrollo sociocultural y sostenible que trae en la convergencia de varias disciplinas como la arquitectura, la ingeniería, las ciencias sociales y el medio ambiente, y relaciona al río Medellín con la fauna, la flora y los habitantes, ofreciendo mejores posibilidades para la movilidad de los peatones, las bicicletas y los vehículos, que se integra con los demás proyectos de Medellín, en este caso con la visita a los cerros tutelares como el Cerro Nuribara y Cerro el Volador.

El Cerro Nutibara es una formación montañosa de tamaño medio con una composición de roca anfibolítica (roca metamórfica), ubicado en el centro geográfico del Valle de Aburrá, en la margen occidental del río Medellín en medio de la zona urbana, y es uno de los pocos ecosistemas que ha sido conservado en la localidad (Alcaldía de Medellín, 2003). En un principio, en la época de los conquistadores españoles, recibió el nombre de Morro de Marcela de la Parra y luego Morro de los Cadavides (González, 2012). Siguiendo todo el eje del río Medellín a la altura de la Universidad Nacional, sede el volador, se puede ascender al Parque Natural Regional Metropolitano Cerro El Volador, siendo un parque natural, denominado el más grande dentro del área urbana de la ciudad de Medellín que cuenta con un área de 107,13 hectáreas y 82 metros de altura sobre el nivel de la ciudad (González, 2012). Su principal objetivo en cuanto al aspecto arqueológico se trata es de rescatar, conservar y difundir "in situ" estas evidencias culturales. Además, contribuir a la recreación de la ciudadanía, pues en este lugar se pueden desarrollar actividades como observación de aves, elevación de cometas, caminatas, ciclismo y picnics o camping. Este cerro tiene una posición de privilegio en medio del Valle de Aburrá pues desde allí se observa el Valle en toda su dimensión.

Junto con el Cerro Pan de Azúcar, Cerro El Salvador, Cerro El Volador, Cerro La Asomadera, Cerro Las Tres Cruces, Cerro El Picacho y el Cerro Santo Domingo, conforma el grupo denominado cerros tutelares de la ciudad de Medellín. Son una red de accidentes geográficos a lo largo del Valle de Aburrá que posee un importante valor histórico, arqueológico, ecológico y turístico dentro de la ciudad (González, 2012).

#### **4.6.4 Ruta de Occidente**

Partiendo de la Facultad de Minas, se encuentra El Museo de Mineralogía (también llamado Museo de Geociencias) es una entidad museal sin ánimo de lucro ubicada en la ciudad de Medellín, especializado en la Mineralogía, gracias a información de la Universidad Nacional sabemos que cuenta con una exhibición permanente de un total de 2.778 ejemplares, sus colecciones son reconocidas por los expertos mineralogistas como unas de las mejores de los museos de Suramérica, sirve de apoyo académico en lo concerniente a las ciencias de la tierra, facilitando a la comunidad geológica y al público en general el libre acceso al mundo de los minerales y las rocas. Adicionalmente, en la facultad de Minas se encuentran los Murales de la Facultad de Minas, en el aula Máxima, Obra realizada por el Maestro Pedro Nel Gómez, uno de los principales muralistas de Latinoamérica. Las edificaciones Aula Máxima (bloque M5) y el Bloque M3 fueron también diseñados por el Maestro Pedro Nel Gómez y fueron Declarados Monumentos Nacionales en 1994.

Tomando la vía al Mar antes del túnel de Occidente, se desprende una ruta hacia la antigua vía al Mar y hacia San Pedro de los Milagros, esta última conocida como la ruta de la Leche, por esta se tiene acceso a los altiplanos occidentales que circundan el valle y los altos de Norte a Sur Alto de San Félix, Boquerón (2600 msnm), Alto Las Cruces (2400 msnm) y alto del Alto Padre Amaya (3100 msnm) hacia San Antonio de Prado. Desde estos lugares se tienen las mejores panorámicas del Valle de Aburrá, donde se divisan los altiplanos Orientales y las superficies de erosión ampliamente explicadas en Rendón (2003).

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1. Cuantificación de la Geodiversidad

La geodiversidad es considerada una propiedad importante del paisaje, ya que en ella encontramos la relación de dos componentes: la riqueza y uniformidad (Spellerberg y Fedor, 2003); la riqueza está conformada por el componente compositivo de la diversidad dejando como referencia el número de clases diferentes en un mapa categórico, y la uniformidad es ese componente estructural de la diversidad, permitiéndonos cuantificar la distribución del área del valle entre las diferentes clases ( 5 clases) en este caso.

Existen varios métodos, en los cuales se puede medir la geodiversidad de una manera diferente según distintos factores, como es la asignación de valores por peso, en este caso se le asignaron valores según el criterio de importancia, tal como lo es la información que esta nos brinda del área, sea geológica, geomorfológica o simplemente climática. Con estas variables y los conocimientos adquiridos se pudo tener un criterio de importancia a la hora de evaluar las zonas que conforman el valle. En cualquiera de los componentes de diversidad encontrados en los mapas resultantes todos resaltaban las zonas de mayor altitud como lo son los cerros tutelares que “vigilan” todo el contraste del valle, el objetivo de este proyecto fue reconocer las zonas que podrían estar incluidas en un estudio más exhaustivo y darles el reconocimiento geológico y patrimonial que merecen, no solo por su historia sino hacer parte de esta evolución que se ha venido teniendo el valle del Aburrá, sino la historia que cuentan estos sitios, el valor biótico y abiótico que contienen y junto con esto generar una georuta que enmarque estos sitios de alta geodiversidad.

Definimos que la riqueza es un parámetro parcialmente controlado por la escala, ya que si notamos las áreas más grandes son generalmente más heterogéneas en comparación a las áreas más pequeñas. En un intento de comparar paisajes con diferentes áreas, se ha aplicado la metodología existente del estudio realizado por Benito-Calvo (2009) para desarrollar un mapa de geodiversidad con 3 variables (geológica, morfoclimática y morfométrica) dando como resultado un mapa de diversidad geológica del Valle del Aburrá, resaltando el relieve con las unidades morfométricas asociadas a la geología del Valle. Sin embargo, en este caso se quiso adaptar la metodología de Benito-Calvo (2009) para el estudio del valle, pero adicionándole una variable más al análisis, en este caso la

geomorfología, para hacer del análisis algo más específico y detallado de los diferentes parches que resaltan en la zona. Se obtuvo mayor detalle a la hora de analizar las 5 clases resultantes. Si se hace una comparación con el mapa que obtuvimos con las 3 variables (Figura 18), realizado con el ráster geomorfológico en vez del morfométrico; obtuvimos mayor contraste en las zonas de alto rango en este caso 4 y 5 destacando la presencia de materiales de origen oceánico, al sur-occidente del valle, cercano a Caldas, La Estrella y Medellín, al mismo tiempo se definen unas vertientes montañosas altas, largas, de fuerte pendiente correspondientes de la divisoria de aguas hacia la cuenca del río. Adicionalmente, se presentan dos complejos ofiolíticos, uno muy asociado con el sistema de fallas de Romeral, al sur y occidente de valle y otro hacia al costado oriental, denominado Complejo Ofiolítico de Aburrá (Rendon 2003), representado en la dunita de Medellín, sobre cuyo cuerpo meteorizado han ocurrido los mayores desastres que han afectado la ciudad catalogados en un bajo valor geodiverso. La zona del cauce es evidente en ambos mapas en tonalidad verde (valor de 1) destacándose mejor en el mapa con el ráster geomorfológico y sobre todo los depósitos que conforma el valle, sin dejar de lado que el río hace parte de nuestro patrimonio hídrico y es respetado pero que en la zona de estudio no presenta un alto valor (ya se le está dando, ejemplo parques del río). En pequeños parches encontramos los cerros contrastando la geodiversidad con valores de 5 a 4 como se ve en la Figura 20.

Finalmente, para tener el resultante del mapa de geodiversidad se combinaron estos tres conjuntos de datos espaciales, mediante una operación de álgebra de mapas, donde obtuvimos una clasificación del terreno. Uno de estos conjuntos de datos fue el mapa morfométrico, que según la metodología de Benito (2009) era superponer 4 variables (pendiente, curvatura, rugosidad y relieve relativo) y de este surgía el morfométrico; Pero se quiso hacer un cambio a esta y sacar el mapa de elevación reclasificado con la opción de natural breaks en el Software ArcGIS ya que se consideró que brinda una información más clara y contundente para el estudio que se necesitó, ya que es totalmente extraído del DEM y abarca la escala suficiente al estudio (escala altas a medias), por ende al sacar un mapa morfométrico perdía relevancia a la hora de superponer los mapas.

En comparación a otros trabajos como lo son el estudio de geodiversidad que se usó para cuantificar la geodiversidad de Creta, Grecia por los autores Argyriou, A., *et al*, 2016; estudios de valoración de la geodiversidad y su importancia por el autor Gray 2013-2018;

El estudio de geodiversidad y biodiversidad del paisaje postglacial del río Dębnica, Polonia por Najwer, A., et al, 2016; entre otros.

El presente estudio contó con un DEM con una escala de resolución de 2x2 y mapas geológico y geomorfológico en escala 1:10.000, lo cual se convierte en una ventaja para resaltar la geodiversidad en el VA, dándoles un valor agregado a la zona, que no solo alberga en su interior una amplia geodiversidad in-situ, sino también ex-situ como se mencionó en las georutas propuestas: Ruta Universitaria y ruta del río Medellín.

El crecimiento acelerado y desordenado en algunos sectores de la Urbe, hace necesario la búsqueda del desarrollo sostenible en un concepto multidimensional que involucra, por lo menos tres dimensiones: lo ambiental, lo económico y lo social (Teviño y Sánchez, 2009); en este sentido el desarrollo sostenible aplicado al urbanismo implica que ese límite urbano se proteja para que se dé una relación sistemática entre la naturaleza y el ser humano, implementando tres aspectos, donde lo urbanístico ocasione el mínimo impacto en el medio y el espacio donde ha de desarrollarse la ciudad proponiendo consumir la cantidad menor de recursos y energía y generar la menor cantidad posible de residuos y emisiones. En este sentido el urbanismo también debe buscar la restauración ambiental, implementando ordenamiento ecológico como estrategia para ordenar las actividades económicas de la ciudad, así como el uso racional del territorio, hacer congruente la vocación territorial con las actividades productivas y las construcciones de la ciudad, las diferentes intervenciones y funciones que se prevén para un territorio determinado y el desarrollo socioeconómico equilibrado entre regiones. En lo económico un desarrollo urbano viable, significa que no deberá comprometer más recursos que los estrictamente necesarios en los proyectos de desarrollo y a la vez éstos deben aportar una ventaja económica a la ciudad y sus habitantes, donde evidentemente se incluye la generación de empleos y elevar la competitividad de la urbe, con la intención de ir generando la equidad económica entre la sociedad (Teviño y Sánchez, 2009). **Contemplando el bienestar** de la sociedad que responda a las demandas sociales de su entorno, mejorando la calidad de vida de la población, y asegurando la participación ciudadana en el diseño del valle. La integración holística en el urbanismo sostenible entiende que las condiciones para mejorar la calidad de vida en la ciudad se basan en los determinantes físicos del medio ambiente, y en el mejoramiento de las condiciones de vida humana por lo que se requiere un progreso económico y un desarrollo social (Pérez, 2014).

En ese sentido, la cuantificación de la geodiversidad y las propuestas de georutas propuestas en el presente estudio, se convierten en una herramienta de planificación, hacia un urbanismo sostenible designando áreas de intervención y modificación donde se pretende armonizar viviendas con paredes más verdes, construcciones más consientes, corredores verdes, geo rutas de conocimiento y de geo conservación, con el fin de ayudar a estructurar en el territorio metropolitano un tejido residencial consolidado o en proceso de consolidación y los suelos rurales en proceso de establecer un desarrollo sostenible y compatible con el entorno rural, junto a la priorización de paisajes.

La geodiversidad debería ser incluida en los instrumentos de planificación, no sólo en diseños de muros verdes que es una reducción de lo ambiental a la imagen de muchos, sino en la definición de suelos de protección por parte de autoridades ambientales y municipales y que se pueda obtener un equilibrio en lo urbano con lo natural.

## **5.2 Importancia de la clasificación Geomorfológica sobre la Hipsométrica**

La obtención de los de un mapa con los valores cuantitativos generando una geodiversidad más detallada del valle, basándose en la heterogeneidad de las propiedades geológicas y geomorfológicas de la superficie terrestre. De las 37 unidades descritas se desplegaron y así se procedió a asignarles un valor de 1 a 5 según su información litológica de la macro unidad, composiciones en cuanto a paisaje se trata, que tan contrastado es el paisaje y si le da un alto valor a la visual del valle de Aburrá, un orden de importancia de alturas también se tomó en cuenta, ya que se definió que a mayores alturas las zonas están más protegidas y menos expuestas a la alteración antrópica.

Cuando se realizó el mapa de geodiversidad con el mapa geomorfológico, se obtuvo un mapa mucho más detallado, que permitió resaltar más zonas con alta valoración geo diversa. Dando así valores más acordes con geodiversidad expresada en la evolución geológica y geomorfológica representada en el paisaje del valle de Aburrá comparado con la metodología de (Benito-Calvo et al.,2009).

## 6. CONCLUSIONES

El análisis procedente de este trabajo fue intentar principalmente proponer un procedimiento unificado para la cuantificación de la geodiversidad a través de mapas ráster de agregación de componentes del medio natural, como base de evaluativa multicriterio o criterio del experto. El método adoptado logró buenos resultados que reflejaron un paisaje extremadamente variado dentro del valle de Aburrá. Los resultados obtenidos permitieron concluir que la metodología utilizada era correcta y podría aplicarse en otras áreas similares. Los mapas producidos de acuerdo con un procedimiento dado pueden encontrar una amplia gama de aplicaciones, como lo son el categorizar zonas de alto valor geodiverso y darle prioridad a la hora de hacer un plan de conservación.

La resolución de datos geospaciales (2 m) permite el uso de los mapas creados principalmente para el análisis de la evolución del paisaje a una escala detallada, con fines de planificación para preparar proyectos para el desarrollo del área local, planes de prevención y cuidado de zonas con alta diversidad abiótica, como también rutas ecológicas del paisaje integrando turismo con la importancia geológica del sistema.

En estos últimos años se han venido desarrollado diversas metodologías para evaluar la geodiversidad (Carcavilla *et al.*, 2007; Bruschi, 2007; Serrano y Flaño, 2007), con el fin de proporcionar herramientas objetivas para la geoconservación y gestión del patrimonio abiótico. En este trabajo, hemos probado índices de diversidad de paisajes (MacGarigal *et al.*, 2002), para evaluar la geodiversidad regional (Valle de Aburrá). Los resultados indican que estos índices de diversidad espacial pueden ser de gran utilidad para evaluar y determinar el manejo de tierras valiosas desde el punto de vista de la naturaleza, así como para delimitar nuevas formas de preservación de esta. El procedimiento también puede convertirse en una herramienta excepcional y universal para facilitar la gestión adecuada de los recursos del entorno natural con el fin de establecer un geoparque ó una georuta, así como el turismo y especialmente el geoturismo. Es de esperar que los resultados de la investigación presentados se utilicen en el desarrollo del valle en cuanto a geoconservación de nuestros cerros, panorámicas del valle y empinadas laderas que rodean este; Todo a partir de mapas factoriales y totales de geodiversidad y biodiversidad, también es posible presentar acciones que prevengan, minimicen o compensen el impacto negativo sobre el medio natural.

Cabe resaltar que el mapeo de campo nos brindará la oportunidad para aclarar los datos que se obtuvieron espacialmente. Sin embargo, la información secundaria de distintas fuentes de alta resolución, permitió hacer procedimientos y procesamientos pertinentes para estrategias futuras de divulgación geocientífica.

## 7. REFERENCIAS

AMVA (2015). *Zonificación sísmica del Valle de Aburrá*. Area Metropolitana del Valle de Aburrá

Alcaldía de Medellín (2003), *Medellín, Guía Turística y de Desarrollo Urbano*, Impreso por Especial Impresores, Medellín, pp. 52, 75, 77. ISBN 958-33-5064-8

Aristizabal, E., Barry, R., & Yokota, S. (2005). Tropical chemical weathering of hillslope deposits and bedrock source in the Aburrá Valley, northern Colombian Andes Author links open overlay panel. En *Engineering Geology* (págs. 389-406).

Argyriou, A. V., Sarris, A., y 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.

Barthlott W., Biedinger N., Braun G., Feig F., Kier G., Mutke J., 1999. Terminological and methodological aspects of the mapping and analysis of the global biodiversity. *Acta Botanica Fennica* 162: 103–110.

Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Magri, O., & Meza, P., 2009. Assessing regional geodiversity: the Iberian Peninsula. *Earth surface processes and landforms*, 34(10), 1433-1445.

Botero, G., 1963. Contribución al conocimiento de la geología de la Zona Central de Antioquia. *Anales de la Facultad de Minas*. 57, 101 p. Medellín.

Botero, Fabio (1994). *Cien Años de la Vida de Medellín*. Editorial [Universidad de Antioquia](#), Medellín. [ISBN 958-655-319-1](#).

Brilha, J., 2018. Geoheritage: inventories and evaluation. In: Reynard, E., Brilha, J. (Eds.), *Geoheritage: Assessment, Protection, and Management*. Elsevier. Amsterdam, 1, 69-86.

Bruschi VM. 2007. *Desarrollo de una metodología para la caracterización, evaluación y gestión de los recursos de la geodiversidad*, PhD Thesis, Universidad de Cantabria, Santander; 355 pp

Carcavilla et al., 2011 L. Carcavilla, A. Belmonte, J. Duran, A. Hilario Geoturismo: concepto y perspectivas en España. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra: Revista de La Asociación Española Para La Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*.

Carcavilla y Luis. 2012. *Geoconservación*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Cardenas y Restrepo 2006 J. Cardenas, C. Restrepo. Patrimonio Geológico y Patrimonio Minero de la Cuenca Carbonífera del Suroeste Antioqueño, Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*.

Calonge et. al., 2013 A. Calonge, G. Fermeli, G. Meléndez, C. Carvalho, J. Rodrigues. La importancia de las geo-rutas en la enseñanza de la geología. Cuadernos del museo geominero Vol (2013)

Conacher, A.J., Dalrymple, J.B., 1977. The nine-unit landsurface model: an approach to pedogeomorphic research. *Geoderma* 18, 1–154.

Chorley RJ, Schumm SA, Sugden DE. 1984. *Geomorphology*. Methuen & Co: London; 605 pp.

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.

Duff k., 1994. Natural Areas: a holistic approach to conservation based on geology. *Geological and Landscape Conservation*: 121–126. london.

F. Ego, M. Sebrier Is the Cauca–Patia and Romeral fault system left- or right-lateral? *Geophys. Res. Lett.*, 22 (1995), pp. 33-36

González R., Hernando (30 de abril de 2012). *Los Cerros Tutelares de Medellín. El Colombiano*. p. [www.elcolombiano.com](http://www.elcolombiano.com)

Gray, M., 2013. *Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature*, second ed. Wiley Blackwell, Chichester

Gray, M., 2018. Geodiversity: the backbone of geoheritage and geoconservation. In *Geoheritage*. Elsevier, 1, 13-25.

GSM—Grupo de Sismología de Medellín, 2002. Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones. Area Metropolitana del Valle de Aburrá, Internal report, Chapter 3: Geología del Valle de Aburrá, 76 pp.

Hermelin, M. 2015. Landscapes and landforms of Colombia. *Landscapes and Landforms of Colombia*.

Henaó Casas, J. D., & Gaspar Monsalve. (2018). Geological inferences about the upper crustal configuration of the Medellín – Aburrá Valley (Colombia) using strong motion seismic records. En *Geodesy and Geodynamics* (págs. 67-76). Medellín, Antioquia: KeAi Chinese Roots global impacts.

Ingeominas. (2005). *GEOLOGIA DE LA PLANCHA 147 MEDELLÍN ORIENTAL*. Medellín.

Latorre Mendoza, Luis (2006). *Historia e historias de Medellín*. Editorial [Instituto Tecnológico Metropolitano](http://www.instituto-tecnologico-metropolitano.com), Medellín. [ISBN 958-97823-2-9](https://doi.org/10.1016/j.tam.2006.09.001).

Marín 2016 M.I. Marín Cerón. Georutas y patrimonio geológico en los alrededores de Medellín- Universidad EAFIT

Marín Cerón y Arboleda 2018 M.I. Marín, M. Arboleda. Georutas en las centrales hidroeléctricas de ISAGEN. Universidad EAFIT. Escuela de Ciencias, Departamento de Ciencias

M. Maya, H. Gonzalez Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia  
Bol. Geol. Inst. Investig. Geocienc., Miner. Quim. Ingeominas, 35 (1995), pp. 43-57

Medellín, *su Origen, Progreso y Desarrollo*. Servigraficas, Medellín. 1981. ISBN 84-300-3286-X.

Medina y Monge 2012 M. Medina, M. Monge. Estrategia de Geodiversidad de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai. España: León.

Morales 1998 J. *Guía práctica para la interpretación del patrimonio: el arte de acercar el legado natural y cultural al público visitante*. (Junta de Andalucía, Ed.). Sevilla - España.

Najwer, A., Borysiak, J., Gudowicz, J., Mazurek, M., Zwolinski, Z., 2016. *Geodiversity and biodiversity of the postglacial landscape (Debnica river catchment, Poland)*. Quaest. Geogr. 35, 5-28.

NOROCCIDENTE, A. S. (2017). *PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS REGIONAL*. Medellín.

Page 1992 N. Page. Site information boards for geological and geomorphological SSSIs.

Pardo 2004 P. Santano. ¿Qué actividades proponen los libros de texto elaborados para enseñar Geología?.

Ratajczak-Szczerba M., 2013. Geo- i bioróżnorodność doliny Środkowej Noteci i doliny dolnej Gwdy szansą rozwoju eoturystyki. *Acta Geographica Silesiana* 14: 71–86.

Rendón, D.A., 2003, Tectonic and sedimentary evolution of the upper Aburrá Valley, northern Colombian Andes, Unpublished MS thesis, Shimane University, 135 pp.

Restrepo, J.J., Toussaint, J.F., 1984. Unidades Litológicas de los alrededores de Medellín. Mem Primera Conf Riesgo Geol. V. de A., Medellín, 20 pp.

Sáenz, Laura (19 de octubre de 2016) *¿En qué está el proyecto Parques del Río en Medellín?*

Serrano, E., Flaño, P., 2007. Geodiversity: concept, assessment and territorial application. The case of Tiernes-Caracena. Boletín de la AGE 45, 389–393.

Serrano, E., y Ruiz-Flaño, P., 2009. Geomorphosites and geodiversity. In: Reynard, E., Coratza, P., Regolini-Bissig, G. (Eds.), Geomorphosites. Pfeil, München, 1, 49-61.

Serrano, E., y Ruiz-Flaño, P., 2007. Geodiversity: concept, assessment and territorial application. The case of Tiernes-Caracena (Soria). Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 45, 389-393.

SCHEIBE, R., 1934 (elaborado en 1919). Informe sobre resultados de la Comisión Científica en Antioquia. Compilación Estudios Geológicos Oficiales en Colombia. 1: 97–167. Bogotá.

Tavera et al., 2017 M. Tavera Escobar, N. Estrada Sierra, C. Errázuriz Henao, M. Hermelin. Georutas o itinerarios geológicos: un modelo de geoturismo en el Complejo Volcánico Glaciar Ruiz-Tolima, Cordillera Central de Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*.

W. McCourt, J. Aspden, M. Brook New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion  
J. Geol. Soc., 141 (1984), pp. 831-845

Wimbledon 1996 W. Wimbledon, S. Anderson, Christopher, J.C Geological World Heritage: GEOSITES a Global Comparative Site Inventory to Enable Prioritisation for Conservation. In *The Second International Symposium on the Conservation of the Geological Heritage*. Roma.

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