



Uso de tecnología LiDAR en contextos arqueológicos. Revisión caso cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, corregimiento de Santa Elena, Medellín – Antioquia.

Laura Raigosa García

Trabajo de grado presentado para optar al título de Antropóloga

Asesora

Sofía Botero Páez, Magíster (MSc) en Arqueología

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Sociales y Humanas
Antropología
Medellín, Antioquia, Colombia
2025

Cita	(Raigosa García, 2025)
Referencia	Raigosa García, L. (2025). <i>Uso de tecnología LiDAR en contextos arqueológicos. Revisión caso cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas corregimiento Santa Elena, Medellín – Antioquia</i> . [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



CRAI María Teresa Uribe (Facultad de Ciencias Sociales y Humanas)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Dedicatoria

A Sofía por su infinita paciencia y apoyo, incluso en los momentos más complejos; a Iván, por sus valiosos comentarios y perspectivas, que enriquecieron este proceso; a Pedrito, por estar siempre ahí, recordándome que no estoy sola en este camino; a Salvia, por su leal y cálida compañía con sus pequeñas dosis de calma y alegría.

Tabla de contenido

Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
1 Antecedentes	13
1.1 Ecología de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas	13
1.2 Geología de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas.....	15
1.3 Arqueología en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas	18
2 Arqueología del paisaje ¿por qué en Santa Elena?	35
2.1 Maneras de ver e interpretar el paisaje.....	36
2.1.1 <i>Espacio</i>	36
2.1.2 <i>Territorio</i>	37
2.1.3 <i>Paisaje</i>	38
2.1.4 <i>Ambiente</i>	39
2.2 Análisis del paisaje	40
2.2.1 <i>Dimensiones del Paisaje</i>	41
2.2.1.1 Dimensión ambiental.....	42
2.2.1.2 Dimensión económica.....	42
2.2.1.3 Dimensión sociopolítica	43
2.2.1.4 Dimensión simbólica	43
2.3 Maneras arqueológicas de mirar el paisaje: arqueología no invasiva	44
2.3.1 <i>Fuentes documentales</i>	45
2.3.1.1 Imágenes satelitales	45
2.3.1.2 LiDAR	46
2.3.2 <i>LiDAR y arqueología</i>	47
2.3.2.1 Análisis de datos LiDAR para uso arqueológico.....	49

2.3.2.2 Visualización de datos LiDAR	50
2.3.2.3 Visualización del terreno - Aplicaciones	52
3 LiDAR. Caso cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas. Contexto minero aventaderos - Chorro Clarín.....	55
4. Recomendaciones para uso de LiDAR en zonas arqueológicas.....	60
4.1 Planificación del proyecto LiDAR:	60
4.1.1 Contexto geográfico y ambiental	60
4.1.2 Consideración de la vegetación y cobertura forestal.....	61
4.2 Elección del equipo y la plataforma LiDAR	61
4.2.1 Plataformas Aéreas: aviones, helicópteros y drones	62
4.2.2 Plataformas terrestres: vehículos y estaciones fijas.....	62
4.3 Procesamiento y filtrado de datos.....	63
4.4 Integración con otras técnicas y datos	63
4.5 Validación de resultados y trabajo de campo.....	64
5. Otros casos de teledetección en Colombia.....	66
5.1 Aplicaciones de la teledetección en la Sierra Nevada De Santa Marta, Colombia	66
5.2 Documentación digital de ecosistemas Kársticos	70
Referencias	76

Lista de figuras

Figura 1 Mapa de la cuenca hidrográfica de la quebrada Piedras Blancas	15
Figura 2. Mapa geológico simplificado del valle de Aburrá. La línea discontinua marca el borde de la cuenca del valle. En la parte superior izquierda: valle tributario de La Iguaná.	17
Figura 3. Mapa. Contexto minero “Lote 125” con todos los elementos identificados.	24
Figura 4. Corte en la parte superior de la ladera que demarca la alteración en el sector sur. ...	25
Figura 5. Posible “pila” ubicada en la parte superior de la ladera.....	25
Figura 6. Posible reposadero.....	26
Figura 7. Muro en piedra a la quebrada Piedras Blancas.	27
Figura 8. Carguero de roca de anfibolia.....	27
Figura 9. Muros en piedra canalizando tramos de la quebrada Piedras Blancas	28
Figura 10. Canal poco profundo.	29
Figura 11. Socavón identificado en la ladera inmediata a la quebrada Piedras Blancas	30
Figura 12. Mapa correspondiente al contexto minero aventaderos	31
Figura 13. Modelo tipo Color Shaded Relief contexto minero de “Aventaderos”.	33
Figura 14. Mapa. Zoom de la cima con las convenciones de los elementos identificados en el contexto minero “Aventaderos”	34
Figura 15. Esquema de captación de datos LiDar.	47
Figura 16. Eliminación de los edificios, izquierda, o la vegetación, derecha, para crear un modelo de MDE con el que analizar el terreno.	49
Figura 17. Caracterización topográfica del terreno.	52
Figura 18. Localización de entidades arqueológicas. Identificación de sitios arqueológicos	53
Figura 19. Caracterización topográfica del entorno de un asentamiento arqueológico.....	53
Figura 20. Identificación de obras de infraestructura, como las vías o parcelarios.....	54
Figura 21 Distribución de altura de vuelo sobre la superficie.	58
Figura 22. Mapa. Altura del vuelo sobre la superficie (m).	59
Figura 23. Localización de Congo – Ciudad Antigua (A) y Ciudad Perdida (B)	67
Figura 24. Modelo general de Congo-Ciudad Antigua basado en TLS	68

Figura 25 Clasificación supervisada de fotogrametría (imágenes construidas utilizando ArcMap); (B) clasificación supervisada de TLS; (C) vectorización raster de la clasificación TLS	69
Figura 26. Ortofoto obtenida mediante tecnología dron.	72
Figura 27 Fotogrametría de media resolución 0.07 mm.....	73
Figura 28 Documentación de lienzo rupestre en resolución de 0,7 m.m.	74
Figura 29 Andamiaje montado para la documentación fotogramétrica del arte rupestre	74

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CHM	Modelo de Altura de Dosel
DSM	Modelo Digital de Superficie
DTM	Modelo Digital del Terreno
EPM	Empresas Públicas de Medellín
GPR	Radar de Penetración Terrestre
ICANH	Instituto Colombiano de Antropología e Historia
LiDAR	Light Detection and Rancing
MDE	Modelo digital de Elevación
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PCA	Análisis de Componente Principal
PIMF	Plan Integral de Manejo Forestal
RVT	Relief Visualization Toolboy
SIG	Sistema de Información Geográfica

Resumen

Llevar a cabo investigaciones arqueológicas en áreas con densa cobertura vegetal ha sido un desafío, no solo por la dificultad de acceder a estas regiones, sino también por las limitaciones en la identificación del potencial arqueológico debido a la escasa visibilidad del terreno. En este sentido, desde la perspectiva de la arqueología del paisaje se buscó analizar herramientas que permiten no solo hacer frente a dichas dificultades sino también generar una visión de amplio espectro de los lugares a investigar donde se podría evidenciar el potencial de estos.

La investigación se centró en el estudio arqueológico realizado en 2019 al contexto minero “aventaderos” ubicado en el corregimiento de Santa Elena – Medellín, en la vereda Piedras Blancas, en el sector conocido como Chorro Clarín, ubicado en zona de reserva forestal y zona de protección arqueológica a la cual se le realizó un levantamiento altiplanimétrico y topográfico en el año 2018 con tecnología LiDAR cuyos resultados pueden generar un escenario propicio para el debate.

Palabras clave: arqueología del paisaje, LiDAR, minería, piedras blancas, Santa Elena.

Abstract

Carrying out archaeological research in areas with dense vegetation has been a challenge, not only due to the difficulty of accessing these regions but also because of the limitations in identifying archaeological potential due to the low visibility of the terrain. In this regard, from the perspective of landscape archaeology, the aim was to analyze tools that not only address these difficulties but also provide a broad-spectrum view of the places to be investigated where the potential of these areas could be evidenced.

The research focused on the archaeological study conducted in 2019 of the mining context 'aventaderos' located in the Santa Elena township of Medellín, in the Piedras Blancas village, in the sector known as Chorro Clarín, situated in a forest reserve zone and archaeological protection zone where an altiplanimetric and topographic survey was carried out in 2018 using LiDAR technology, the results of which can generate a conducive scenario for debate.

Keywords: landscape archaeology, LiDAR, mining, piedras blancas, Santa Elena.

Introducción

Uno de los mayores desafíos que se enfrenta la arqueología en la actualidad al momento de realizar investigaciones en zonas con alta cobertura forestal, es la identificación de evidencias arqueológicas que se pueden presentar en este tipo de contextos. La densidad boscosa afecta al investigador no solo en la dificultad de acceso al lugar, sino principalmente en el reconocimiento de características arqueológicas al tener una visibilidad muy afectada por el entorno. Así mismo, presenta grandes retos al momento de realizar la documentación, excavación y registro de estos.

El lugar de interés de la presente investigación es la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas que abarca el área de influencia del Parque Arví y sus alrededores, en el corregimiento de Santa Elena, municipio de Medellín, y una porción del municipio de Guarne, la cual se encuentra ubicada dentro de una de las cuatro hoyas hidrográficas en las que se divide la Zona Forestal Protectora del río Nare creada en 1971. Tiene una función protectora con una clara subdivisión de zonas, como lo son la libre recreación, la recreación controlada, incluso algunas zonas restringidas y prohibidas al público. Para 1998, 16 km² de la cuenca fueron declarados como Bien de Interés Nacional por medio de la Resolución 0797 de 1998 del Ministerio de Cultura. (Corantioquia, Cornare 2010, citado en Botero 2017).

Ahora bien, la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas posee una gran importancia cultural, evidenciada por la presencia de numerosos vestigios arqueológicos que se extienden a lo largo de su territorio. Entre estos descubrimientos se incluyen una extensa red de caminos, canales, muros construidos tanto en piedra como en tierra, además de espacios claramente definidos conocidos como campos circundados, excavaciones profundas, cortes en laderas, modificaciones en los cauces de las quebradas y sistemas de desagüe avanzados. Aunque la cronología de estos elementos no está completamente establecida, su distribución a lo largo y ancho de la cuenca sugiere la utilización de diversas técnicas constructivas a lo largo del tiempo. De igual forma, dentro del paisaje de la cuenca, se pueden observar fenómenos que indican una actividad minera intensa relacionada con la extracción de sal y oro desde tiempos prehispánicos. Sin embargo, la literatura relacionada con estas actividades, en términos de trabajo, construcciones y gestión de recursos, resulta algo confusa. Lo que se describe en los textos no siempre coincide con lo que se puede inferir de las evidencias encontradas en el terreno. (Botero, 2017).

Para este trabajo, se considerará el estudio realizado en 2018 por la empresa Batimetría S.A.S., que llevó a cabo una cartografía utilizando tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) para la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, cubriendo un área total de 2500

hectáreas. Sin embargo, uno de los pocos lugares que ha sido objeto de análisis dentro de esta cartografía es el polígono conocido como contexto minero de Aventaderos. Los resultados de este análisis no cumplieron con las expectativas de los investigadores, quienes señalan que las condiciones contextuales del área de estudio, como la variabilidad en la cobertura vegetal, dificultan la efectividad de la cartografía realizada con la tecnología mencionada para fines arqueológicos.

A partir de estos resultados, surge la inquietud de ¿Cómo se explica que la cartografía realizada en 2018 con tecnología LiDAR en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas no obtuvo los resultados esperados? para lograr esto, se revisaron y analizaron los informes y datos obtenidos para el levantamiento altiplanimétrico por parte de la empresa encargada, en este caso Batimetría s.a.s., con el fin de conocer un posible por qué los resultados no fueron los esperados, adicionalmente, surge la premisa de recomendaciones enfocados en acompañar futuras investigaciones arqueológicas utilizando la misma tecnología LiDAR.

Este documento aborda los siguientes aspectos: en primer lugar, se examina la ecología, geología y arqueología conocida de la zona; en segundo lugar, se realiza un análisis desde la perspectiva de la arqueología no invasiva, empleando tanto la arqueología como herramientas de teledetección, como la tecnología LiDAR; finalmente, se presentan las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos en Aventaderos. Asimismo, se ofrecen una serie de indicaciones para futuros trabajos con tecnología LiDAR en contextos arqueológicos. Además, se presentan dos trabajos con realizados en Colombia con tecnologías de teledetección, los cuales abordan perspectivas distintas: uno aborda los desafíos de su aplicación en bosques tropicales, mientras que el otro se enfoca en la conservación de sitios arqueológicos.

1 Antecedentes

1.1 Ecología de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas

La cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas se sitúa en la Cordillera Central, al oriente del valle de Aburrá y al occidente del valle de San Nicolás de Rionegro, en el departamento de Antioquia. Esta área está en el extremo oriental de la ciudad de Medellín, en el corregimiento de Santa Elena. (Roldán, Posada & Gutiérrez, 2001). A principios de la década de 1970, se tomaron decisiones significativas en relación con la conservación y desarrollo de la cuenca. En 1971, como parte de estas iniciativas, se creó un área protegida de orden nacional: la Reserva Forestal Protectora del río Nare. Esta reserva abarca una extensión de 15.590 hectáreas (118,25 km²) dentro de los límites de los municipios de Medellín y Guarne, con una significativa porción de 4327,8 hectáreas ubicadas en el corregimiento de Santa Elena. Ubicada a altitudes que fluctúan entre los 1950 y 2900 metros sobre el nivel del mar, la reserva se encuentra rodeada por imponentes cerros que delinear su perímetro, como el Pan de Azúcar, Cerro Verde, El Venteadero, La Yegua, Morro La Tablaza, y altos como Santa Catalina, el Chuscal, La Mona, Perico, Espíritu Santo, Patio Bonito, Romerillo, de la Pelada, de la Paloma, San Ignacio, de la Polca, del Pino, Cuchillón, Tres, Cerro Puertas, El Chiquero y La Honda, entre otros. En el año 1970, con el propósito de caracterizar la Zona Forestal Protectora del río Nare, se planteó una división del territorio en cuatro zonas, correspondientes a las cuencas hidrográficas de Piedras Blancas, La Honda, Santa Elena y las Palmas. Estas zonas orientadas principalmente hacia funciones de protección delimitaron estratégicamente el área. Para la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas, se formuló la recomendación de designar como Monumento Nacional el espacio comprendido por el triángulo conformado por la Laguna de Guarne, el Alto de la Virgen y la Llave de Piedras. Se destaca especialmente el reconocimiento de la laguna como un lugar de interés para llevar a cabo actividades recreativas. (Corantioquia & Cornare, 2010, citado en Botero, 2017).

En relación con lo anterior, es importante tener presente que, dentro del marco histórico de Medellín, durante los primeros siglos de la colonia, el suministro de agua provenía principalmente de la quebrada Ana o Santa Elena. Sin embargo, a partir de 1879, ante la necesidad de construir un acueducto que garantizara un abastecimiento adecuado, se optó por conducir las aguas de la quebrada Piedras Blancas y sus afluentes, estableciéndola como la principal fuente hídrica. Inicialmente, este suministro se realizaba a través de acequias para posteriormente ser canalizado por tuberías. A partir de 1915, el municipio de Medellín inició la

compra de tierras en la zona con el objetivo de mejorar las condiciones ambientales esenciales para el suministro adecuado de agua a la ciudad. En 1918 el concejo de Medellín ordenó comprar las tierras de la cuenca, la empresa del acueducto (hoy Empresas Públicas de Medellín – EPM) las compra con el propósito de reforestar y manejar los bosques. (Botero, 2017).

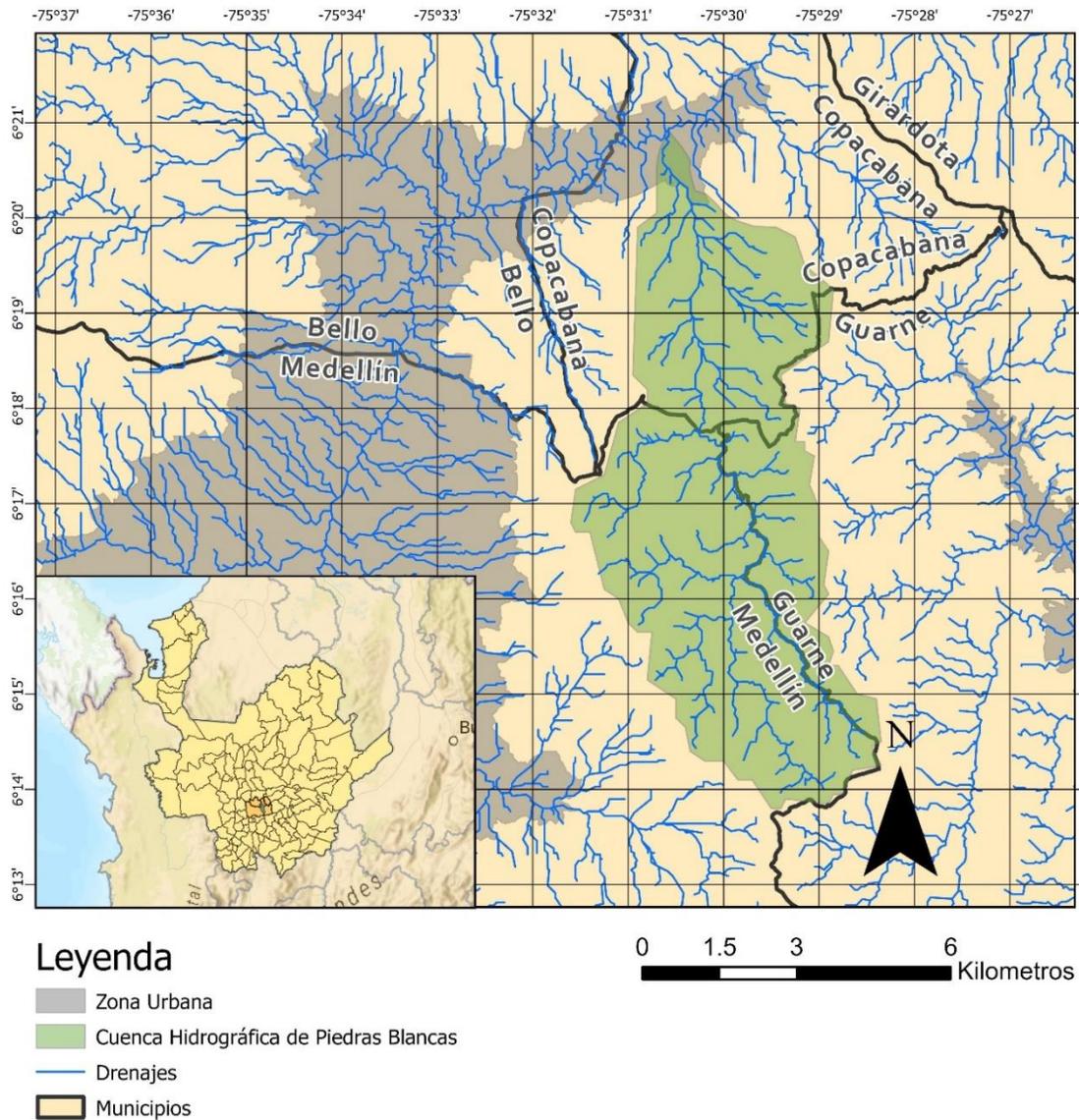
A pesar de los esfuerzos desplegados, las imágenes aéreas capturadas en 1945 para la zona pintan un panorama desolador. Gran parte del territorio aparece prácticamente desprovisto de cobertura forestal y cubierto mayormente por rastrojos y pastizales, con escasos remanentes de bosque nativo, a pesar de que desde 1930 ya se había registrado el crecimiento de las primeras plantaciones de coníferas (*Crupressus lusitánica*, *Pinus patula* y *Pinus elliotti*) y de especies nativas como cañafístula macho, pimienta y roble. Las coníferas de origen norteamericano y mexicano demostraron una notable adaptación a las condiciones del suelo y el clima. (Botero, 2017).

Al explorar un posible entorno agrícola en la cuenca, es esencial tener en cuenta la fertilidad natural del suelo, la cual se catalogaba como baja y muy baja. A pesar de que los suelos exhiben una moderada acidez y un elevado contenido de materia orgánica, se ven afectados por la saturación de aluminio y presentan niveles reducidos de fósforo, potasio y bases totales, no obstante, resulta crucial comprender que la aparente pobreza del suelo no implica automáticamente la presencia de un ecosistema de escasa diversidad y vitalidad (Botero, 2017). Así, también se ha considerado, que, en ausencia de intervención humana, la cuenca habría dado lugar a densos bosques, identificados por Holdrige (1978) como

Bosque húmedo premontano y bosque húmedo montano bajo: los estudios palinológicos revelan la presencia de palmas y en la actualidad se conservan parques de robles (*Quercus humboldtil*), chagualo (*Clusia* spp.), amarraboyos (*Meriania nobilis*), sietecueros (*Tibouchina lepidota*), chirlobirlo (*Tecoma stans*), carate (*Vismia* spp.), encenillo (*Weinmannia pubescens*), arrayán (*Myrcia popayanensis*), candelo (*Croton* spp.), canelo, etc. (Velez & Botero, 1997; Universidad Nacional de Colombia – EPM, 2002). Los estudios palinológicos señalan además la existencia de palmas y muestran picos de apertura de bosques y cambios de vegetación, asociados a la actividad humana desde hace por lo menos 3000 años (Botero, 1999; citado en Botero, 2017, p. 86).

Figura 1

Mapa de la cuenca hidrográfica de la quebrada Piedras Blancas



1.2 Geología de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas

Desde un punto de vista morfológico el valle de Aburrá es descrito como:

una depresión con orientación sur-norte de fondo plano, localizado en la parte alta de la cordillera Central, [...] Las alturas del fondo del valle varían entre 1000 y 3000 msnm hacia su nacimiento. El interior del valle es caracterizado por terrazas, llanuras aluviales a lo

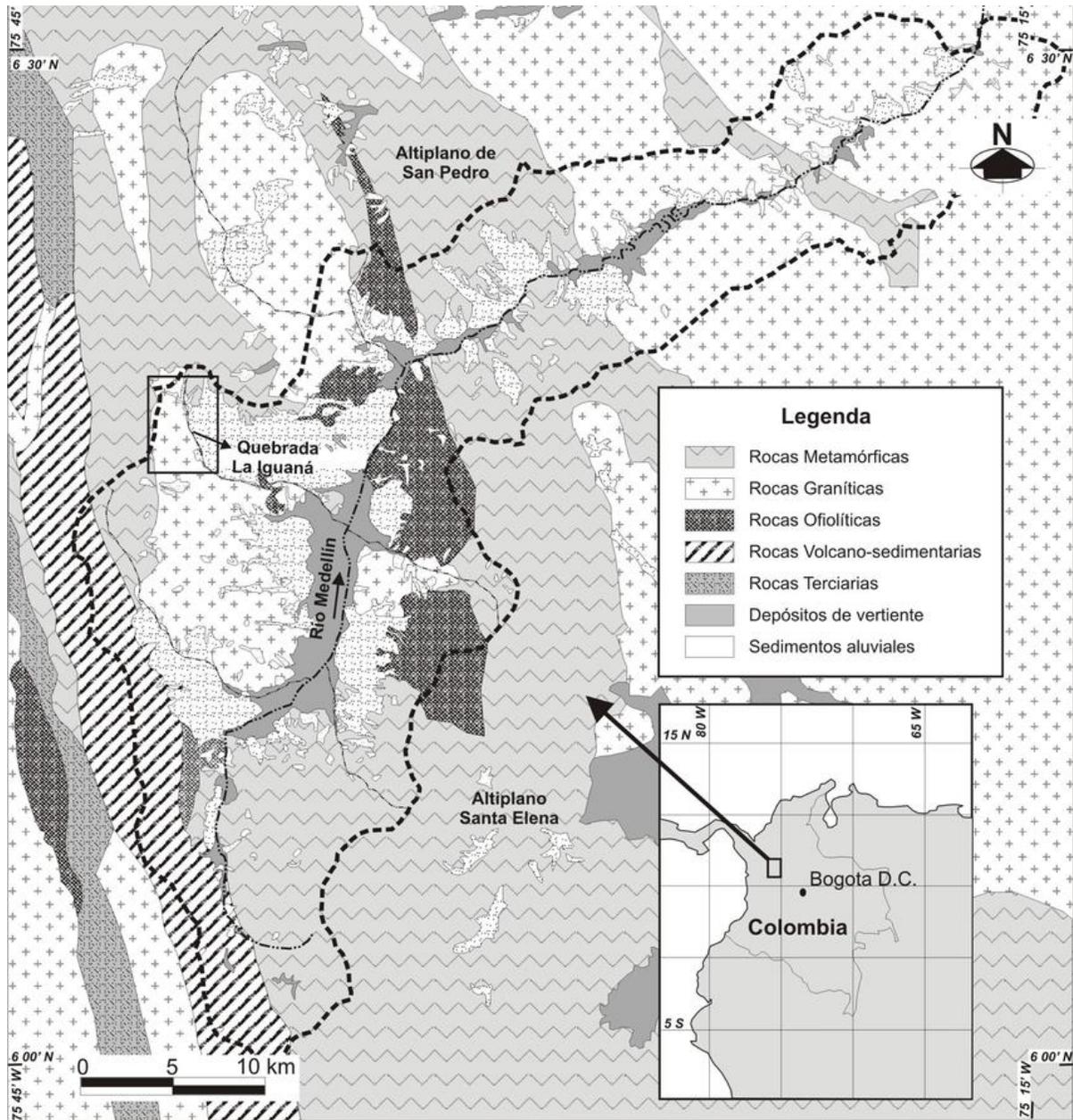
largo del río Medellín y depósitos aluviales que forman abanicos a lo largo de sus principales tributarios. (Arias, 2008, citado en Aristizábal & Yokota, p. 7).

La cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas se ubica estratégicamente en los ramales montañosos que enmarcan al oriente el valle del río Medellín. Estos ramales montañosos son parte esencial del macizo antioqueño oriental, dividido por las aguas del río Porce en dos secciones distintas. La sección oriental se configura como un altiplano muy disectado, reconocido regionalmente como el oriente antioqueño. Dentro de esta vasta extensión, la parte occidental alberga la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, una región geológicamente clasificada como perteneciente al grupo Ayurá-Montebello. Esta zona, exhibe características geológicas notables, se identifican predominantemente ortoanfíbolitas y sus variantes, posiblemente con una antigüedad paleozoica. En ciertas porciones de la cuenca, especialmente en las vertientes, se vislumbran afloraciones de batolito antioqueño, en términos generales, toda la zona se encuentra cubierta por depósitos de cenizas volcánicas muy meteorizadas, con un espesor que oscila entre treinta y ochenta centímetros. (Pérez & Ramírez, 2018).

Los suelos de la cuenca de Piedras Blancas se han desarrollado a partir de un sustrato compuesto principalmente por cenizas volcánicas, marcando su singularidad en un entorno caracterizado por abundantes lluvias y bajas temperaturas. Los suelos presentan una marcada lixiviación que deja un horizonte blanquecino y una banda de hierro acumulado. De igual manera, hay presencia de gleyización, en ocasiones intensa, añade complejidad a la narrativa del terreno. El horizonte superior, se revela una generosa acumulación de materia orgánica que, en áreas con vegetación natural, se convierte en una gruesa capa de humus bruto. La apariencia de estos suelos se asemeja a la de un podzol gleyizado, y su composición, enriquecida con alofano, los clasifica dentro del grupo alofano-húmico. En las pendientes más profundas, donde afloran los esquistos micáceos y cloríticos del material metamórfico, los suelos arcillosos y franco arcillosos de tonalidades pardo-rojizas se consolidan como parte de las colinas altas. (Pérez & Ramírez, 2018).

Figura 2.

Mapa geológico simplificado del valle de Aburrá. La línea discontinua marca el borde de la cuenca del valle. En la parte superior izquierda: valle tributario de La Iguaná.



Nota: Tomado de: Evolución geomorfológica del valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa (Aristizábal & Yokota, 2008)

Sin embargo, la riqueza geológica contrasta con la austeridad química de estos suelos, caracterizados por su acidez extrema, con un pH fluctuante entre 4,5 - 5,0. La escasez de nitrógeno y fósforo asimilables limita su capacidad para sostener cultivos agrícolas, requiriendo una considerable aplicación de cal y fertilizantes. Aun con estos esfuerzos, el rendimiento de

muchos cultivos en estas tierras no alcanza niveles satisfactorios, desvelando los desafíos que enfrenta la explotación agrícola en este entorno. (Pérez & Ramírez, 2018)

En la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas se han observado notables transformaciones en el paisaje, destacándose algunas como la remoción masiva de tierras, junto con la presencia de canales, cortes en ladera, acequias y piscinas diseñadas para la recolección de agua. Estas modificaciones fueron identificadas durante la ejecución del diagnóstico para el plan de manejo arqueológico en el área protegida de Piedras Blancas, dentro del Parque Regional Arví. El propósito de este diagnóstico era llevar a cabo estudios exhaustivos que permitieran realizar comparaciones y complementar la escasa información disponible hasta el momento en relación con los aspectos vinculados al proceso de explotaciones mineras. (Botero, 2018, citado en Gómez Londoño, 2019). En investigaciones llevadas a cabo en la cuenca, en lo que se considera como contextos arqueológicos, se ha observado que la actividad minera no se ajusta por completo al modelo de minería de aluvión, vinculado directamente a la quebrada, ni tampoco a la explotación de filones. En cambio, se identifica un tipo de explotación centrada en vetas poco profundas que se encuentran en un estado avanzado de meteorización, específicamente en ubicaciones concretas. (Gómez, 2019).

1.3 Arqueología en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas

En el marco de esta investigación, dirigiremos nuestra atención hacia ciertos estudios realizados en el Valle de Aburrá, específicamente aquellos llevados a cabo en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, las cuales de una u otra manera contribuyeron a la declaración de un Área Protegida de orden nacional en el departamento de Antioquia conocida como *Área Arqueológica Protegida Piedras Blancas*. Esto se debe a que,

En la cuenca Alta de la quebrada Piedras Blancas ubicada en el municipio de Medellín (departamento de Antioquia) se ha reportado un importante conjunto de evidencias arqueológicas de modificación del paisaje en época prehispánica y colonial, correspondientes a salados, acequias, campos de cultivo, canalización de quebradas, muros de contención y redes de camino de interconexión entre los Valles del Cauca y el Magdalena. (resolución 24 del 14 de febrero de 2019).

Como se mencionó, la cuenca es de gran relevancia arqueológica, ya que en este se ha constatado la presencia “de una densa red de caminos, canales, muros en piedra y en tierra;

espacios claramente delimitados (campos circundados), excavaciones profundas, cortes en ladera, adecuaciones sobre los cauces de las quebradas y notorios sistemas de desagüe.” (Botero, 2017, p. 85). Su complejidad y la variedad de estas estructuras indican un vasto conocimiento en ingeniería y un alto nivel técnico y de planificación. Además, su distribución a lo largo y ancho de la cuenca sugiere un conocimiento significativo del entorno geográfico por parte de las personas que lo construyeron. De igual manera, como es mencionado por Botero (2017), aunque estos hallazgos arqueológicos están identificados, aún hoy, requieren ser abordados en su totalidad y en sus diversos contextos, considerando diversos análisis integrales que permitan no solo identificar técnicas constructivas y temporalidades asociadas, sino también interpretar el posible propósito de cada componente.

Antes de adentrarnos en los estudios arqueológicos más cercanos a la cuenca, es crucial mencionar que desde 1986, arqueólogos como Gustavo Santos han llevado a cabo investigaciones en el Oriente antioqueño, específicamente en la altiplanicie de Rionegro. Su estudio ha marcado el inicio para explorar la presencia de sal en la región, fundamentándose en la abundancia de fragmentos cerámicos y en el método conocido utilizado para la obtención de sal en la época prehispánica. La investigación de Santos fue llevada a cabo en el municipio del Retiro, cerca de la represa la Fe, en el sitio conocido como *Los Salados*, este sitio era reconocido por la presencia de fuentes y pozos de aguasal que se conocía habían sido explotados hasta tres décadas antes de iniciar la investigación. Además de ser reconocido como un asentamiento indígena, ya que se identificaron viviendas dispuestas estratégicamente alrededor de estas fuentes salinas, allí se hallaron capas con acumulaciones de fragmentos cerámicos a poca profundidad, considerándose estas acumulaciones de fragmentos como el producto de la explotación intensiva y constante de sal, dado que es sabido que la obtención de sal implicaba hervir aguasal en grandes vasijas abiertas que posteriormente se rompían para extraer los bloques o los llamados *panes de sal* (Santos, 1986), así, las evidencias arqueológicas halladas en este sitio despertaron un interés por el conocimiento de la historia de la explotación y el comercio de la sal en Antioquia.

En otras investigaciones, centradas en el área de la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, como la llevada a cabo por Botero & Vélez (1995), se buscaba establecer una correspondencia estratigráfica entre la cerámica encontrada al interior de unas construcciones denominadas *campos circundados* y la hallada en superficie. El propósito era poder orientar la investigación hacia un análisis cerámico con la intención de delimitar áreas de producción o dispersión a un nivel regional, que pudiera proporcionar una base que facilitara la identificación y clasificación de la cerámica en un contexto cultural e histórico específico. Aunque hay que

considerar que la estratigrafía para estas huertas se consideró imprecisa debido a la roturación secular de los suelos, además el elevado grado de fragmentación de la cerámica dificultó su identificación y reconstrucción. Por lo que, con el fin de alcanzar la correspondencia estratigráfica deseada, los investigadores optaron por realizar excavaciones en un sitio identificado por los campesinos de la zona como *El Tiestero*. Este sitio llamó la atención de los investigadores debido a la destacada presencia de material cerámico en la superficie, y que, al realizar la excavación, se observó que el material estaba dispuesto de manera ordenada siguiendo la secuencia de depositación. Entre el material cerámico encontrado se catalogaron en dos conjuntos: el conjunto cerámico que se ha considerado *marrón inciso*, y el conjunto de la cerámica que se supone utilizó en el procesamiento de la sal. Sin embargo, los autores inician un debate sobre la clasificación, ya que muchas piezas encontradas no cumplen con las características formales de las tipologías propuestas. Además, encuentran problemático depender de un tipo de clasificación, ya que esto no contribuye a comprender quienes fueron los creadores de las piezas ni su conexión intrínseca con la vida. (Botero & Vélez, 1995)

Otros trabajos llevados a cabo en la cuenca se han realizado tras la revisión de descripciones históricas, como es el caso de *los relatos de la conquista* redactados en 1541 por Pedro Cieza de León, Jorge Robledo y Juan Bautista Sardella durante su paso por el valle de los aburráes, ha permitido a investigadores como Norberto Vélez y Sofía Botero en 1997, llegar a conclusiones, tales como que,

algunos caminos que transitaron los conquistadores corresponden a los que, de occidente a oriente y de norte a sur, cruzan la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas y que el camino que desde el centro del valle, sube por el noroccidente del cerro Pan de Azúcar y llega a la Laguna de Guarne, es el que utilizaron Álvaro de Mendoza y Jorge Robledo en 1541, y que es justo este camino el que el cronista Cieza de León, consideró antiguo y muy grande. (Botero, 2017, p. 94).

También se ha de considerar, entre las evidencias arqueológicas de modificación del paisaje que se encuentran en la cuenca, los denominados *campos circundados*, reportados en la década de 1990 por la arqueóloga Sofía Botero y los cuales podrían tener una antigüedad de 2.900 años antes del presente. Estas construcciones no solo revelan transformaciones en el entorno, sino que también sugieren la posibilidad de haber sido parte de un antiguo sistema de apropiación y utilización intensiva del suelo, dentro de un ecosistema profundamente alterado. Reconocidas como un rasgo distintivo en el paisaje, estas construcciones son áreas elevadas en

forma de polígonos irregulares, delineadas por muros o paredes de 1 y 2 metros de altura, lo que les otorga su denominación característica. (Botero, 1999).

Además, es crucial tener presente que durante la investigación de estas construcciones se tuvo en cuenta el conocimiento que los campesinos poseían en ese momento sobre el uso de estas; esta consideración permitió profundizar en la comprensión de las prácticas agrícolas de la zona. Asimismo, dado que para la época no existían informes o estudios que documentaran estas construcciones, la arqueóloga Botero consideró esencial establecer el carácter antrópico de las mismas mediante el recorrido sobre terreno, así como la observación y registro sistemático de sus formas y límites. Se emplearon igualmente los datos derivados de la cerámica hallada y las fechas obtenidas en los campos circundados, así como de los suelos removidos, cuya textura y estructura son el producto de intervenciones humanas. Así mismo, en la investigación se detectaron materiales extraños, como carbón, cuarzo, arcillas y cenizas endurecidas, así como gránulos de saprolito de anfibolita y materiales plásticos. (Botero, 1999).

Asimismo, la autora sostiene que, para comprender las lógicas de construcción y funcionamiento de estas estructuras, es esencial examinar el contexto de los demás vestigios arqueológicos registrados en la zona. Además, queda aún por dilucidar las razones detrás de la construcción de los campos circundados en un área geográficamente desafiante, un aspecto particularmente sorprendente dada la proximidad de los dos valles inmediatos del altiplano: el de Aburrá y el de Rionegro, los cuales ofrecen condiciones bióticas, climáticas y de fertilidad del suelo más favorables para el asentamiento de grupos humanos. (Botero, 1999).

En el ámbito de contextos arqueológicos que se consideran mineros, encontramos investigaciones relevantes como la llevada a cabo por Mauricio Obregón, Liliana Gómez y Luis Carlos Cardona en 2005, titulada *Mineros ricos y mineros pobres. Tecnología y cultura de un contexto minero entre los siglos XVII y XIX en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas (Antioquia)*. En este, los autores presentan los resultados de la intervención llevada a cabo en el sitio conocido como *El Molino*; allí previamente se habían registrado diversos vestigios de actividad humana, que incluye andenes, muros, plataformas y canales construidos en tierra y piedra.

De acuerdo con la investigación, el contexto estudiado representa los restos de un sitio de vivienda y un entable minero, los cuales pueden distinguirse en dos momentos. El momento inicial se relaciona con una ocupación colonial, que se estima comenzó alrededor de mediados del siglo XVII, y está vinculada a la extracción de oro de aluvial durante un lapso de poco más de un siglo, asociada a las elites de la ciudad de Santa Fe de Antioquia. Durante su segunda fase de ocupación, hacia la parte final del siglo XIX, la estructura de vivienda experimentó

modificaciones con el propósito de iniciar la extracción de oro de veta utilizando tecnologías innovadoras, como el molino de pisones. (Obregón et al., 2005).

Aunque para los investigadores, las figuras prominentes de las élites arraigadas en el valle de Aburrá estaban relacionadas con la explotación de los depósitos aluviales en toda la cuenca de la quebrada Piedras Blancas durante el siglo XVII y XVIII – cuestión que previamente se había mencionado – empleando esclavos, es importante tener en cuenta que, simultáneamente a esta actividad minera “oficial”, Obregón et al (2005) sugiere la existencia indirecta de pequeños mineros empobrecidos conocidos como “mazamorreros”. Aunque estos mineros apenas aparecen en los documentos consultados por los autores, dado que trabajaban sin generar denuncias ni presentar declaraciones formales ante las autoridades, se constata su presencia en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas

También en términos mineros, encontramos la investigación realizada por Botero (2020) denominada *Oro corrido, mazamorras y conciertos en la provincia de Antioquia. Minería colonial para arqueólogos e interesados*. En este la autora analiza no solo una visión detallada de las actividades minera en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, sino que también arroja luz sobre la influencia y la importancia social que aquellos involucrados en la minería colonial en la provincia de Antioquia. De esta manera,

la importancia del paraje la señala el reconocimiento social que tienen sus propietarios; efectivamente, quienes aparecen relacionados con la denominada mina de Piedras Blancas, son reputados españoles, directos descendientes de los conquistadores, primeros colonos el fértil valle de Aburrá, amparados como mineros y reconocidos como dueños de minas en muy distintos parajes de la provincia, es decir, que su importancia no está relacionada con la cantidad de oro sustraído ni con las características de los yacimientos amparados a su nombre. (Botero, 2020, p. 223).

Adicionalmente, la cuenca presentaba ciertas condiciones favorables que la identificaban como un lugar estratégico para la explotación de sus yacimientos, como es el caso de

el aprovisionamiento de las cuadrillas no debía representar un problema difícil y costoso de solucionar. No solo está cerca de un importante centro poblado, plantaciones y hatos, sino que, a ella llegan caminos que la atraviesan desde y hacia distintas direcciones [...] (Botero, 2020, p. 224).

Pese a lo anterior, ingenieros de minas como Pedro Nisser, interesados en la explotación de oro, se refirió a Medellín como

[...] La más pobre productora del metal en toda la provincia. Otro ejemplo sobresaliente de la desigual distribución del metal precioso se presenta en las inmediaciones de esta zona, en donde se descubrieron dos montículos de depósitos aluviales, que contrastaban marcadamente, ya que en uno de ellos abundaba el oro, mientras en el otro era escaso [...] (Nisser, 1990, pp. 18, 35, 58 citado en Botero 2020, p. 224).

Además, se considera que la creencia en la abundancia de oro en la cuenca está relacionada con la presencia indígena previa a la llegada de los conquistadores, evidenciada por numerosos vestigios a lo largo y ancho de la cuenca, lo que también se vincula con la presencia de múltiples ojos de sal. Tanto el oro como la sal ocupaban un lugar de suma importancia y preocupación en la perspectiva y legislación de la Corona, dado que eran productos esenciales de distintas maneras: el oro para la acumulación de riqueza a nivel intercontinental y la sal para asegurar la supervivencia de los habitantes locales. (Botero, 2020).

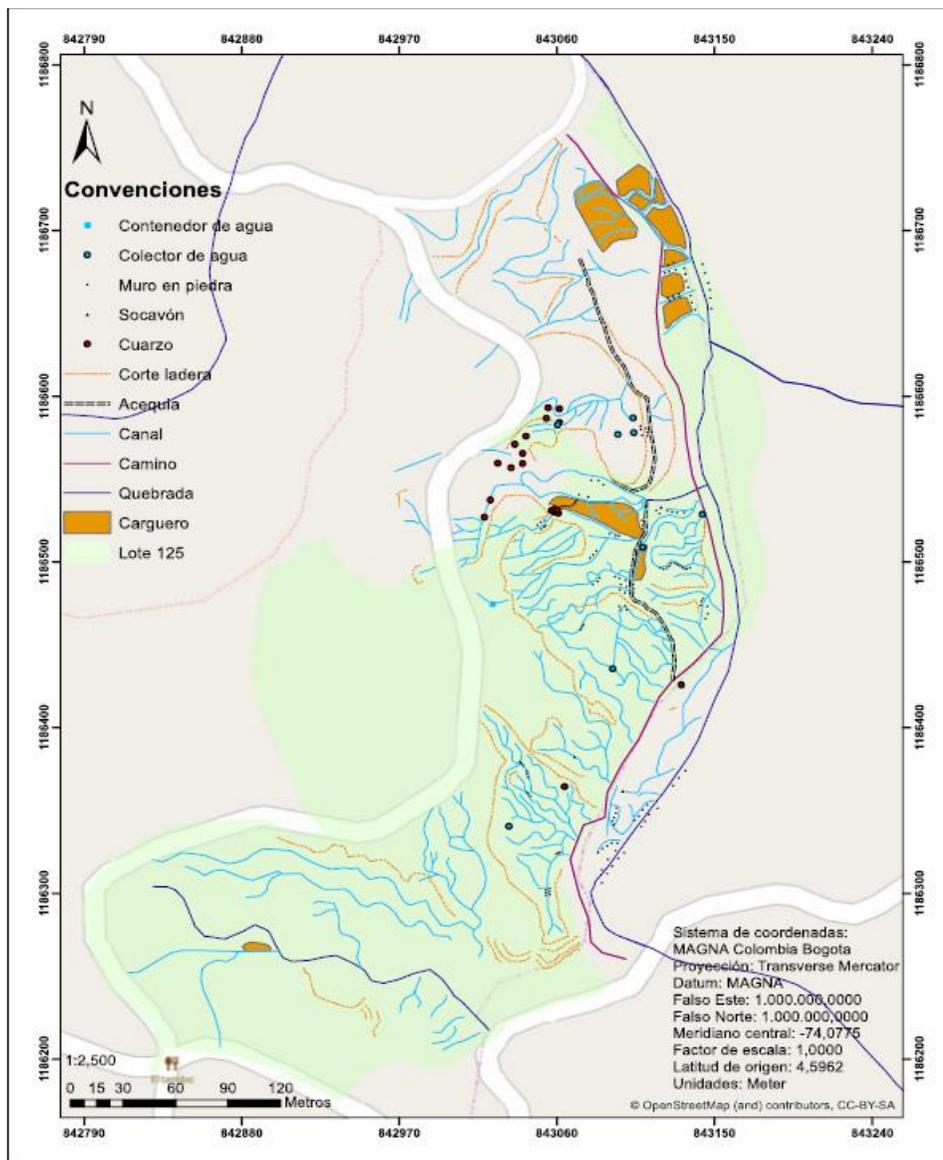
Ahora, dentro de las investigaciones más relevantes para este trabajo en el ámbito de la explotación minera en la cuenca, destaca la investigación realizada por la arqueóloga Liliana Gómez en 2017, en el denominado *Lote 125*, ubicado en el corregimiento de Santa Elena – Medellín en la margen occidental de la quebrada Piedras Blancas, a la altura del vivero de Empresas Públicas de Medellín (EPM). Esta investigación está relacionada con la ejecución del Plan Integral de Manejo Forestal (PIMF) diseñado por EPM para sustituir sus plantaciones forestales en los lotes de su propiedad por vegetación nativa. Este contexto fue previamente identificado durante las actividades de diagnóstico arqueológico, las cuales sirvieron como respaldo técnico para la elaboración del Plan de Manejo Arqueológico del área protegida de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas. Durante la ejecución de este plan, se observó la complejidad del lugar, evidenciada por la presencia de múltiples componentes de diversos elementos relacionados con trabajos de explotación minera, tal como se había constatado en investigaciones arqueológicas previas llevadas a cabo en la cuenca. (Gómez, 2017).

El denominado *Lote 125* adquiere una relevancia significativa ya que presenta de manera simultánea una variedad de elementos que, aunque dispersos en otros lotes, no se encuentran reunidos en un solo lugar como sucede aquí. Esta concentración única de características tales como cárcavas, acequias, cargueros de material inerte (fig. 8) y canales (fig. 10) brinda una oportunidad para comprender los procesos relacionados con la minería no solo de manera

específica, sino también de manera general para toda la cuenca durante las épocas colonial y republicana. Además, contribuye a entender la realidad fragmentada que se ha identificado en otros lugares en relación con la actividad humana. Así, la intervención a este contexto también se justificó ante la necesidad de comprender su magnitud, particularmente en relación con la densidad de los elementos presentes. Esto requirió la identificación de los componentes del sitio, así como la de su disposición espacial y sus interrelaciones, permitiendo llevar a cabo un levantamiento esquemático de todos los elementos que componen el contexto. (Gómez, 2017).

Figura 3.

Mapa. Contexto minero “Lote 125” con todos los elementos identificados.



Nota: Tomado de: Estudio de contexto minero ubicado en el lote 125 del año 5 del plan integral de manejo forestal (Gómez, 2017)

Por lo tanto, el contexto arqueológico minero identificado en el *Lote 125* se puede describir mediante los siguientes elementos:

- **Corte de ladera:**

Es un gran corte paralelo a la ladera con profundidades diferenciales, que está evidenciando grandes volúmenes de tierra removida. Este corte en la ladera está marcando el límite superior donde empieza la intervención del contexto minero, mientras que la parte inferior termina justo en la quebrada Piedras Blancas. (Gómez, 2017, p. 31).

Figura 4.

Corte en la parte superior de la ladera que demarca la alteración en el sector sur.



Nota: Tomado de: Estudio de contexto minero ubicado en el lote 125 del año 5 del plan integral de manejo forestal (Gómez, 2017)

- **Posible contenedor de agua (Pila):**

“Se trata de una excavación rectangular en la superficie original del suelo, en la parte alta, junto antes del corte de la ladera [...]” (Gómez, 2017, p. 33).

Figura 5.

Posible “pila” ubicada en la parte superior de la ladera



Nota: Tomado de: Estudio de contexto minero ubicado en el lote 125 del año 5 del plan integral de manejo forestal (Gómez, 2017)

- **Posible represadero:**

“En la parte media-baja del área intervenida, hacia la parte central del contexto minero, se identificó un área que posiblemente estuviera haciendo las veces de represadero [...]” (Gómez, 2017, p. 34)

Figura 6.

Posible reposadero.



Nota: Tomado de: Estudio de contexto minero ubicado en el lote 125 del año 5 del plan integral de manejo forestal (Gómez, 2017)

- **Muro en piedra paralelo a la quebrada:**

se trata de un muro en piedra que va paralelo a la quebrada Piedras Blancas, y se encuentra ubicado a 4 metros del cauce de la misma. [...] el muro fue elaborado utilizando rocas de cuarzo lechoso en su mayoría redondeados [...] (Gómez, 2017, p. 35).

Figura 7.

Muro en piedra a la quebrada Piedras Blancas.



Nota: Tomado de: Estudio de contexto minero ubicado en el lote 125 del año 5 del plan integral de manejo forestal (Gómez, 2017)

- **Cargueros:**

“son acumulaciones de material inerte generalmente conformados por rocas como anfibolita y cuarzo, los cuales forman depósitos sin ningún tipo de orden [...]” (Gómez, 2017, p. 37).

Figura 8.

Carguero de roca de anfibolia.



Nota: Tomado de: Estudio de contexto minero ubicado en el lote 125 del año 5 del plan integral de manejo forestal (Gómez, 2017)

- **Muro en piedra en el cauce de la quebrada Piedras Blancas:**

“de manera paralela al contexto minero, es posible observar tramos en la quebrada piedras blancas que tienen un muro de piedra; estos muros se encuentran dentro del lecho y pueden alcanzar 60 cm de altura” (Gómez, 2017, p.37).

Figura 9.

Muros en piedra canalizando tramos de la quebrada Piedras Blancas



Nota: Tomado de: Estudio de contexto minero ubicado en el lote 125 del año 5 del plan integral de manejo forestal (Gómez, 2017)

- **Canales:**

Sobre la nueva superficie generada por la remoción de tierra definida por el corte en la ladera, se observa una serie de invenciones que corresponden mayoritariamente a canales con diferentes anchos. [...] estos canales presentan dos tipos de formas, pueden ser de carácter lineal o de carácter dendrítico, es decir con ramificaciones [...] (Gómez, 2017, p. 39).

Figura 10.

Canal poco profundo.



Nota: Tomado de: Estudio de contexto minero ubicado en el lote 125 del año 5 del plan integral de manejo forestal (Gómez, 2017)

- **Socavones:**

se trata de 3 perforaciones horizontales en la ladera [...] Presentan aperturas de boca de dimensiones variables y pueden corresponder a cateos para verificar la presencia de mineral. Presentan similares a los socavones de minería de veta pero con profundidades incipientes. (Gómez, 2017, p. 38).

Figura 11.

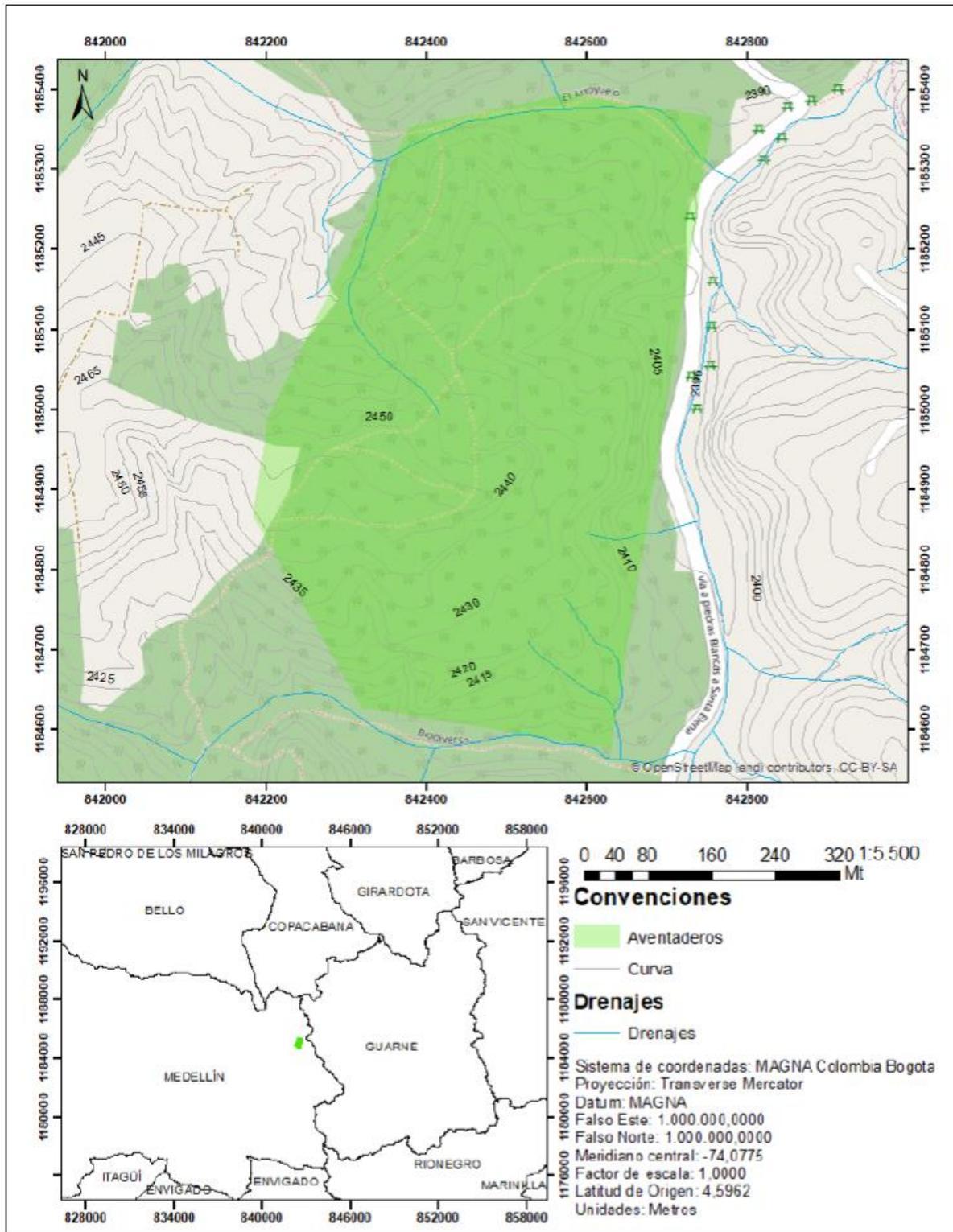
Socavón identificado en la ladera inmediata a la quebrada Piedras Blancas



Nota: Tomado de: Estudio de contexto minero ubicado en el lote 125 del año 5 del plan integral de manejo forestal (Gómez, 2017)

También cabe señalar, que conexo con el Plan Integral de Manejo Arqueológico Parque Regional Ecoturístico Arví para el Área Arqueológica Protegida de Piedras Blancas y el programa de estímulos para el arte y cultura otorgado por la Secretaria de Cultura de Medellín en 2018, la arqueóloga Liliana Gómez (2019) desarrolló un proyecto centrado en el estudio del contexto minero conocido como “Aventaderos”, en ese estudio se buscaba no solo realizar una caracterización del sitio, sino también hacer un análisis relacional de los elementos que componían dos contextos mineros de la quebrada Piedras Blancas: el ya mencionado “Aventaderos” y otro contexto minero denominado “Lote 125”, este último había sido objeto de un objeto de estudio intensivo en 2017, lo que permitió descubrir un proceso de producción de oro en la fase de extracción que hasta ese momento no había sido documentado ni en estudios arqueológicos anteriores ni en la literatura minera del país,

Esto nos permitió visibilizar no solo un modo de extracción del mineral que no era ni aluvión ni filón, sino que evidencio una forma de depositación del mineral de oro, relacionada con venas o venillas de cuarzo en avanzado estado de meteorización, que se intruyen en el material parental de la zona, distribuidas de manera ramificada o en “árbol” y que se caracterizan por su poca profundidad y poco grosor. (Gómez, 2019, p. 9)

Figura 12.*Mapa correspondiente al contexto minero aventaderos*

Nota: Tomado de: Estudio arqueológico del contexto minero de "aventaderos". Chorro Clarín – Piedras Blancas – Corregimiento de Santa Elena. (Gómez, 2019)

Por lo que, avanzar con el estudio del contexto minero “Aventaderos” permitiría profundizar en la comprensión de procesos de explotación minera que tuvieron lugar en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas durante la época colonial y republicana, períodos sobre los cuales se dispone de información limitada. En este contexto minero se propuso realizar análisis especializados, incluyendo un análisis geomorfológico macro – que es de particular interés para el presente estudio – como en estudios complementarios a nivel micro, incluyendo análisis mineralógicos y de micro morfología. (Gómez, 2019).

El contexto minero “Aventaderos” se ubica a la altura del sector Chorro Clarín, vereda Piedras Blancas en el corregimiento de Santa Elena – Medellín, en la margen oeste de la quebrada Piedras Blancas, correspondiendo a un polígono de 33 hectáreas, este contexto es un área alterada donde se identificaron elementos constructivos tales como canales, acequias, canales con muro a un lado y represaderos de agua en la parte alta de la ladera. Además, este polígono fue levantado cartográficamente empleando tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) para obtener datos de elevación del terreno, en este caso, generaron:

una nube de puntos de densidad mínima de entre 20 y 25 puntos/m², que permitieron generar cota de nivel en resolución de hasta 50 centímetros. El levantamiento fue realizado con tecnología LiDAR siguiendo los parámetros de investigaciones desarrolladas a nivel internacional (Cheese et. Al 2012, Massini et. Al 2011, Chase and Weishampel 2016) permitiendo obtener un buen nivel de detalle de las estructuras que conforman el contexto minero sin comprender su integridad estructural.

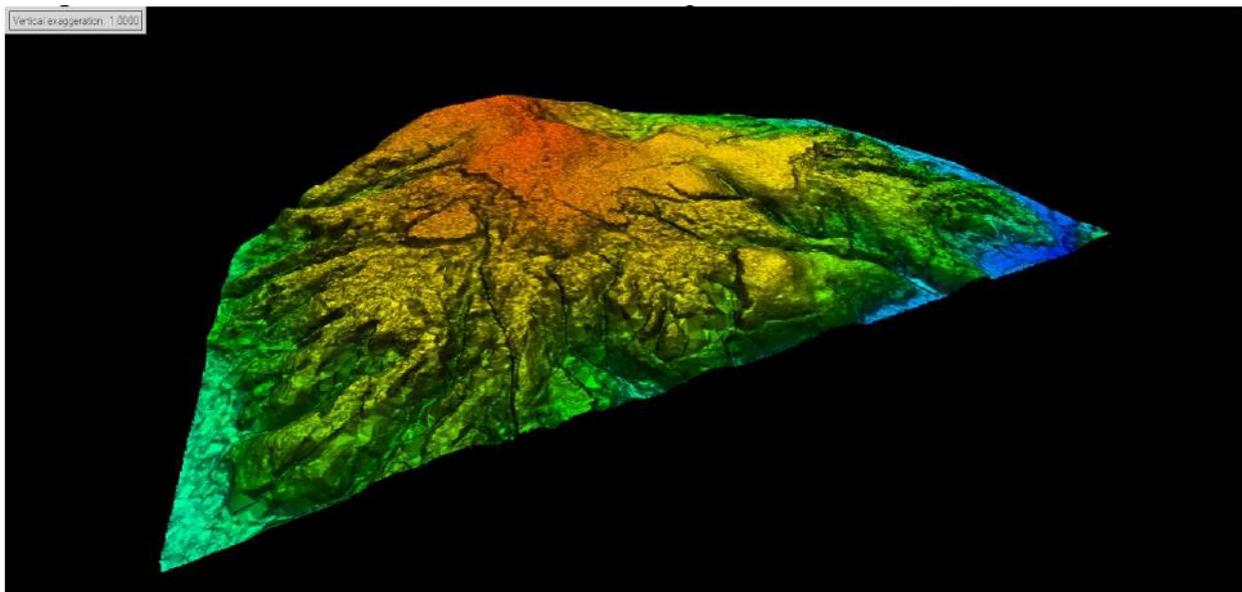
Para la captura de información se utilizó un láser scanner Riegls VQ 480i con capacidad de frecuencia máxima de operación de 550.000 pulsos por segundo, con captura de onda completa (Full Waveform) y procesado MTA con capacidad mutlipulso efectiva para la captura de datos en zonas montañosas. (Gómez, 2019, p. 33)

En el informe presentado por Gómez (2019) se encuentra que para el levantamiento realizado con LiDAR, se montaron los equipos a una aeronave tripulada, donde el vuelo fue realizado tanto a baja altura como velocidad para según ellos garantizar una correcta obtención de datos, así obtener diferentes productos como: nube de puntos; clasificación de elementos en masas forestales, construcciones y piso; Modelo Digital de terreno (DTM); Modelo digital de Superficie (DSM); Curvas de nivel en formato Shapefile; fotografía aérea multispectral; Ortofotomosaico y finalmente un restitución de cartografía básica georreferenciada.

Ahora bien, en la evaluación general de los alcances del LiDAR realizada por Gómez (2019) se concluyó que esta herramienta fue sorpresivamente precisa para identificar cicatrices grandes y profunda en el relieve, así como otras de menor envergadura, sin embargo, no marcó canales más pequeños ubicados en las laderas, lo que requirió un levantamiento de campo adicional; por lo que, tras analizar las condiciones contextuales del área de estudio, se sugiere que las diferencias en los resultados se deben a variaciones en la cobertura vegetal, es decir, los pulsos de luz llegaron a la superficie en cantidad suficiente en las áreas con plantaciones forestales, pero en sectores cubiertos por helechales, parece haber menos puntos que alcanzan el suelo, lo que resulta en una menor cantidad de información sobre los elementos presentes en esa superficie.

Figura 13.

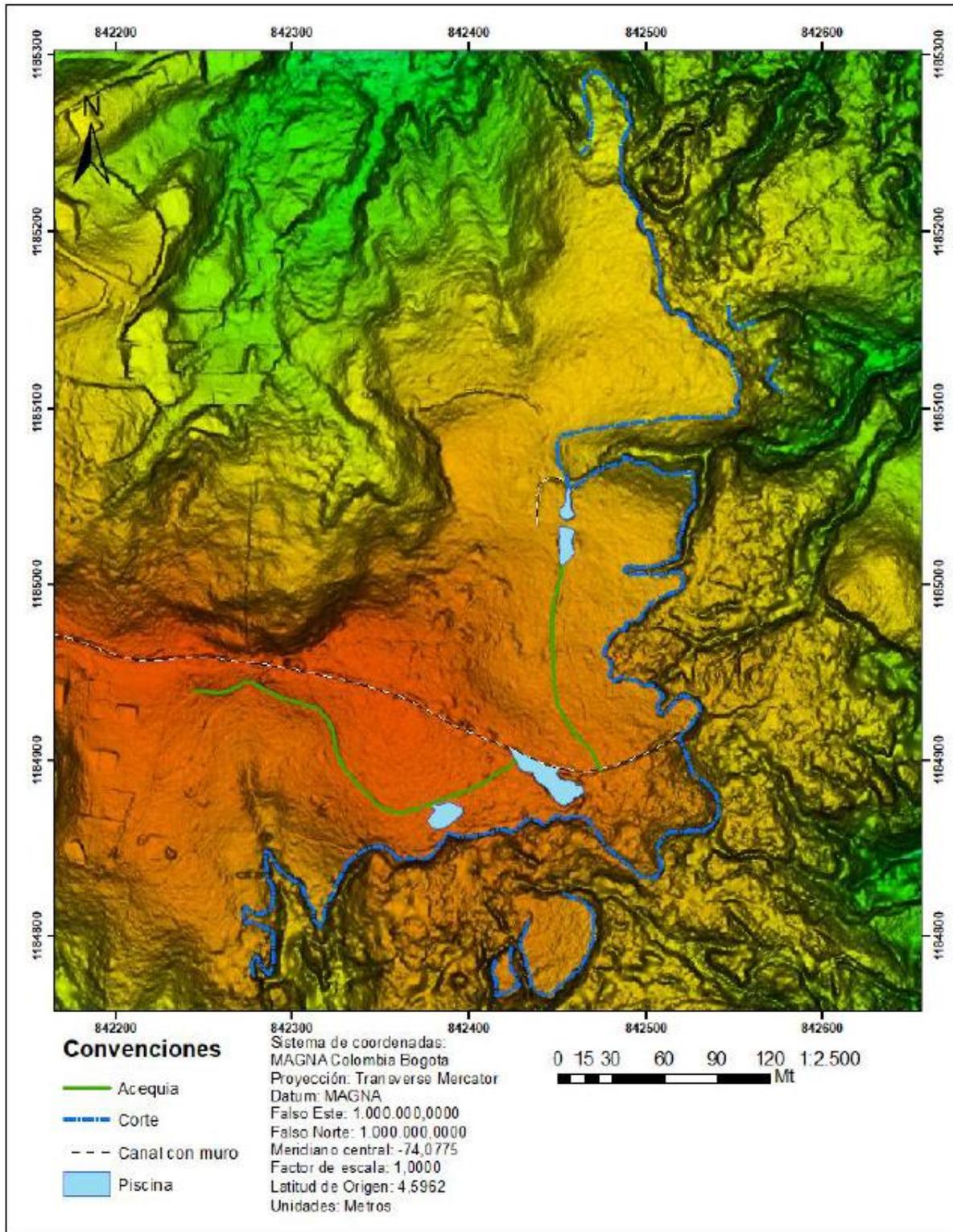
Modelo tipo Color Shaded Relief contexto minero de “Aventaderos”.



Nota: Tomado de: Estudio arqueológico del contexto minero de “aventaderos”. Chorro Clarín – Piedras Blancas – Corregimiento de Santa Elena. (Gómez, 2019)

Figura 14.

Mapa. Zoom de la cima con las convenciones de los elementos identificados en el contexto minero "Aventaderos".



Nota: Tomado de: Estudio arqueológico del contexto minero de "aventaderos". Chorro Clarín – Piedras Blancas – Corregimiento de Santa Elena. (Gómez, 2019)

2 Arqueología del paisaje ¿por qué en Santa Elena?

En la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, en el corregimiento de Santa Elena – Medellín, las evidencias arqueológicas son tan frecuentes que evidencian un fenómeno compuesto por la presencia de canales, muros, caminos, corte de laderas, entre otros, que han dejado una huella significativa en el paisaje, la cual aún es observable en la actualidad. Sin embargo, estos vestigios arqueológicos están actualmente cubiertos por una densa vegetación, como resultado de los esfuerzos de reforestación llevados a cabo en la cuenca. Esta situación plantea un desafío para la identificación de sitios arqueológicos utilizando métodos tradicionales, como lo es la prospección superficial; debido a que esta técnica implica la búsqueda directa de posibles yacimientos o evidencias en el paisaje, resulta insuficiente para abordar las características específicas que presenta esta área.

En algunos estudios realizados en la cuenca se ha optado por realizar prospección aérea (Gómez, 2019), lo que no solo supone examinar grandes extensiones de terreno, sino también llevar a cabo un levantamiento altiplanimétrico junto con la generación de una ortofoto, que permitirían obtener una representación detallada y precisa del terreno, utilizando tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging), la aplicación de esta, facilita la eliminación de la capa de la cobertura vegetal, proporcionando así elementos suficientes para identificar características no visibles desde el suelo, al mismo tiempo, proporcionaría elementos necesarios para la planificación de futuras investigaciones.

Por lo anterior, y dada la riqueza arqueológica de la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, se busca una forma de análisis espacial de las sociedades del pasado a través de la materialidad del paisaje. En este sentido, se adopta el enfoque de la arqueología del paisaje, que no solo integra, interpreta y comprende el paisaje del pasado no solo desde una perspectiva actual, sino que también considera cómo las comunidades que habitaron esos paisajes en el pasado los percibían y construían; además, esta línea de investigación se enriquece con múltiples acercamientos aportados por otras disciplinas que se preocupan por los análisis espaciales (Orejas, 1995 - 1996), lo que permite el uso de métodos no invasivos de reconocimiento del terreno, logrando una aproximación rigurosa al medio físico y la cobertura de amplias áreas para recabar datos; en lo que respecta a la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, se ha intentado modelar el terreno utilizando tecnología LiDAR (Gómez, 2019).

2.1 Maneras de ver e interpretar el paisaje

Ahora bien, en el ámbito de la arqueología prehispánica colombiana, el espacio como objeto de estudio abarca una amplia variedad de interpretaciones, estos incluyen términos como *espacio*, *naturaleza*, *medio ambiente* y *paisaje*, “que dificultan el intercambio de información y debates entre las diferentes perspectivas arqueológicas interesadas en el paisaje” (Gómez, 2011, p. 231). Los diferentes conceptos utilizados para describir el mismo objeto físico son interpretados de manera diversa por los arqueólogos; así, la transformación en las prioridades de investigación y en los enfoques metodológicos tiene un impacto significativo en la forma en que se estudia y se interpreta el patrimonio cultural.

2.1.1 Espacio

En el ámbito arqueológico, cuando se hace mención del concepto de *espacio* “se puede estar hablando a nombre de una perspectiva teórica, implícita o explícita, en el que el espacio físico es neutral, un escenario donde el hombre actúa” (Rodríguez, 1995, citado en Gómez, 2011, p. 232). Por otro lado, la relación entre la arqueología y el espacio abordada desde una perspectiva metodológica, es decir, en un sentido donde los arqueólogos centran sus estudios en cómo recopilar y analizar datos sobre ubicación, distribución y relaciones espaciales de las evidencias arqueológicas, donde los datos se integran y se ajustan desde modelos desarrollados por disciplinas como la geografía y ecología, proporcionan un conjunto de herramientas metodológicas para la arqueología, esto implica una concepción implícita del espacio como una extensión y soporte geofísico, es decir, el espacio es visto como un medio físico en el que se desarrollan las prácticas y procesos sociales. (Piazzini, 2006). Así, se observa que, aunque ambos enfoques reconocen el papel del espacio en el desarrollo de actividades humanas, difieren en cuanto al grado de influencia que este ejerce y en la forma en que se estudia ese impacto. En la perspectiva teórica, el espacio se considera un escenario pasivo, donde las acciones humanas se desarrollan sin una influencia significativa de este. En contraste, la perspectiva metodológica examina como la ubicación, distribución y relaciones de las evidencias arqueológicas están mediados por el espacio.

Ahora bien, también encontramos que el concepto de *espacio* en ocasiones se ha limitado a un enfoque instrumental (a propósito de la perspectiva metodológica como se ha mencionado antes), donde la cuestión espacial se relaciona con las experiencias y concepciones del espacio-tiempo en la modernidad. Esto se manifiesta en tres aspectos:

En primer lugar, una concepción del espacio como “telón de fondo” de lo social; en segundo lugar, una hegemonía del pensamiento del tiempo sobre el pensamiento del espacio como parte de una geopolítica de control de la alteridad; y, en tercer lugar, una idea de las materialidades, conjuntamente con el espacio, como exterioridades. (Piazzini, 2006, p. 5).

Por otro lado, hay una visión del espacio donde este no tiene un significado intrínseco por sí mismo, en cambio, su sentido y significado se construyen a través de la interpretación y experiencia de las personas o comunidades, es decir, “el espacio solo adquiere sentido cuando va acompañado de una lectura del individuo o de la comunidad, que genera determinados comportamientos, actitudes y formas de percepción, que a su vez influyen en la modelación física del espacio” (Orejas, 1995, p. 219), su relevancia y significado está dada en función de cómo los individuos o las comunidades lo perciben y utilizan, las percepciones y comportamientos generan actitudes y prácticas que, a su vez, afectan y moldean esencialmente el espacio, siendo este dinámico.

2.1.2 Territorio

En cuanto al término *territorio*, en su concepción más extendida, se observa que con esta “se puede estar en el terreno de una discusión jurídica o política, y, por tanto, abordar problemas de institucionalización de una organización social compleja en el espacio como jefaturas o estados” (Falchetti y Plazas, 1973; Groot y Hooykaas, 1991; Cárdenas, 1996, Salazar, 2006, citado en Gómez, 2011, p. 232). Sin embargo, se observa que para “antes de los años 70, en las ciencias sociales, el concepto de territorio: no existía afuera de la concepción jurídica del término: un área de control territorial con fronteras y sistemas de denominación” (Mazurek, 2006, p. 41) por lo que, cuando se consideran definiciones como la de Maryvonne Le Berre, encontramos que “el territorio se define como la porción de la superficie terrestre apropiada por un grupo social con el objetivo de asegurar su reproducción y la satisfacción de sus necesidades vitales” (Bailly, Ferras *et al*, 1995, p. 606, citado en Mazurek, 2006, p. 41). De esta manera vemos como el concepto de territorio ha pasado de ser una noción estrictamente jurídica, enfocada en el control y la delimitación espacial, a una concepción más amplia que abarca aspectos sociales, económicas y ecológica. Este cambio denota un reconocimiento creciente de la importancia del

territorio en la vida cotidiana y en la organización de las sociedades, más allá de las fronteras y sistemas de control formal.

A su vez, también hay definiciones donde el territorio resulta de la intervención y transformación que los seres humanos realizan en el espacio, es decir, el territorio no es únicamente un ente natural y estático, sino que también se configura a través de actividades humanas como el manejo, la modificación y el uso del espacio, en dicho sentido:

el territorio es un producto de la actividad humana porque existen procesos de manejo y de transformación del espacio apropiado por parte del hombre. El paisaje, en el sentido de la escuela alemana, es la forma más visible e integrada de la acción del hombre sobre el territorio, que acumula las prácticas territoriales ligadas a la historia, la cultura, el nivel tecnológico, etc. (tenencia de la tierra, sistema de producción, rastros arqueológicos, etc.). (Mazurek, 2006, p. 42)

2.1.3 Paisaje

Entre las formas de acercarse al concepto de *paisaje* se encuentran diversas aproximaciones, una de ellas sería donde el “paisaje, en una de sus variantes, se puede destacar la integridad de lo natural y lo cultural” (Criado, 1991a; Orejas, 1995; Mora, 2005 citado en Gómez, 2011, p. 232). Así mismo, Orejas (1995) destaca cuatro enfoques diferentes para aproximarse al paisaje, por un lado, considera el paisaje como un elemento dado, una perspectiva adoptada en estudios enfocados en el medio físico, que trasciende la distinción entre lo natural y lo cultural; también reconoce las perspectivas “apoyadas en el funcionalismo y en los enfoques ecológicos, desarrolladas a partir de la definición de cultura como una forma de adaptación extrasomática al entorno” (Orejas, 1995, p. 217), este tipo de perspectivas han influido en una visión del espacio que es científica, modelable, medible y enfocada en aspectos económicos y funcionales, en lugar de solo aspectos físicos o estéticos; en un tercer acercamiento, el paisaje se considera una expresión de la nación, representando la identidad colectiva de una nación, raza o grupo étnico, siendo el paisaje percibido como una representación duradera y significativa de esa identidad, marcada por una sensación de permanencia y estabilidad que refuerza el sentido de pertenencia y continuidad; por último, se considera al paisaje como resultado de la actividad humana. Continuando con Orejas (1995) encontramos que, para comprender plenamente un paisaje, es necesario ir más allá de su apariencia superficial y considerar cómo se ha configurado a través de una racionalidad, esto implica utilizar metodologías históricas y arqueológicas para analizar

las prácticas relaciones y percepciones de las comunidades que han moldeado el paisaje y cómo estas influencias se manifiestan en el espacio material.

2.1.4 Ambiente

En el campo arqueológico cuando se habla del concepto *ambiente*, se pueden comprender factores físicos y biológicos, así como condiciones económicas del entorno, que suele ser vistos como determinantes o condicionantes de las acciones humanas; esto puede implicar el tipo de actividades que las personas pueden realizar en un entorno específico esta influenciado o limitado por las características naturales (como el clima, la geografía, disponibilidad de recursos) y las condiciones económicas (como la productividad o los recursos económicos disponibles) (Gómez, 2011). Aunque, de igual manera, se puede encontrar que “el ambiente no debe verse como un factor determinante de la organización social, sino como el marco en el cual las sociedades se establecen y actúan” (Fernández & Grana, 2015, p. 15), es decir, en este caso el ambiente no se considera como una fuerza principal o única que determina cómo se organiza una sociedad, no dicta directamente la estructura social, sino que es más bien un contexto dentro del cual las sociedades se desarrollan y operan, así pues, aunque el entorno puede influir en la vida social, no es el único factor que define cómo se organiza una sociedad.

A diferencia de los otros conceptos previamente mencionados, el concepto de *ambiente* en la investigación arqueológica se vincula a una rama o subdisciplina denominada *arqueología ambiental*, la cual se dedica a comprender los cambios ambientales y a analizar cómo las sociedades se adaptan a los entornos en los que habitan, además, examina de qué manera los grupos humanos modifican sus ambientes, considerando que sus actividades constituyen un factor determinante en la transformación del entorno. (Fernández & Grana, 2015). Así mismo, se conoce que “el objetivo de la arqueología ambiental es determinar la relación entre cultura y ambiente, para lograr un entendimiento completo de la ecología humana de las comunidades prehistóricas” (Fernández & Grana, 2015, p. 15), considerando no solo aspectos sociales, económicos y ecológicos, sino que también recurre no solo a técnicas arqueológicas, sino también métodos provenientes de las ciencias naturales, como la biología y geología, siendo un enfoque interdisciplinario (Fernández & Grana, 2015)

Ahora bien, aunque los conceptos de *paisaje*, *espacio*, *territorio* y *ambiente* están todos interrelacionados y a menudo se solapan en el estudio arqueológico, cada uno resalta diferentes aspectos de la interacción entre las sociedades humanas y su entorno; el *paisaje* pone énfasis en la dimensión cultural y simbólica del entorno; el *espacio* se centra en la organización y

distribución de las actividades humanas; el *territorio* aborda el control y la organización de espacio donde una perspectiva política y social; y *el ambiente*, se enfoca en las condiciones naturales que rodean y afectan a las sociedades. En conjunto, estos conceptos ofrecen una visión multifacética y enriquecedora de cómo los seres humanos interactúan con su entorno a lo largo del tiempo.

2.2 Análisis del paisaje

El estudio espacial de las sociedades del pasado, a partir de la materialidad en el paisaje se inscribe en la línea de investigación de la arqueología del paisaje, cuyo objetivo es analizar a las sociedades y a las personas a través de la organización del espacio que habitaron. En este enfoque arqueológico se va más allá del análisis de sitios individuales o artefactos aislados dentro de su contexto temporal y espacial, para incluir la comprensión de unidades espaciales más extensas y territorios que integran diversos lugares, de esta forma, se pueden comprender aspectos como la economía, las formas de organización social o la caracterización de una cultura a partir de su ordenamiento y configuración espacial. (Grau, 2021).

En este sentido, es de tener presente que, aunque los sitios arqueológicos son importantes, no deben considerarse como entidades aisladas dentro del paisaje, sino que representan lugares donde la actividad humana ha sido más intensa y frecuente, lo que los hace más visibles y fáciles de identificar arqueológicamente. Por lo que el enfoque del análisis arqueológico cambia de centrarse en el sitio -que sería un lugar específico- a considerar el *paisaje* como una entidad más amplia; en este sentido, el *paisaje* se convierte en el objeto principal de estudio, porque se interpreta no solo como un espacio físico, sino como un espacio cargado de significado cultural y social, es decir, “el paisaje, interpretado como el espacio portador de identidad sociocultural” (Parcero, 2002, p. 18, citado en Grau, 2021, p. 9).

Por lo que, en el análisis del paisaje ha de tenerse en cuenta dos aspectos, en primer lugar, que el paisaje es dinámico, ya que siempre está cambiando, es moldeado y reconstruido a lo largo del tiempo; en segundo lugar, el paisaje es estratigráfico, lo cual implica que su composición actual es el resultado de una acumulación de elementos de épocas anteriores, pese a que algunas de estas capas del pasado se hayan modificado o destruido, sus vestigios rara vez desaparecen por completo. Así, el paisaje es solo un espacio físico, sino una creación cultural, única para quienes lo habitan, así, el paisaje que se percibe en el presente es en esencia, una superposición de todos los paisajes previos, reflejando en sus capas las visiones, creencias y racionalidades de quienes vivieron en el pasado, integrándose en la percepción colectiva que tenemos hoy. (Parcero, 2002).

Esto no implica que el carácter acumulativo y dinámico del paisaje haga imposible comprender su estado en el pasado. Aunque el paisaje sea una entidad en constante transformación, este cambio opera, como cualquier otra dimensión histórica, en distintos niveles y escalas. El interés en el estudio del paisaje no se limita a la reconstrucción visual, sino que debe orientarse hacia la reconstrucción del sistema sociocultural que le dio origen. Así, dado que el paisaje refleja y permite entender los sistemas sociales, su dinamismo será equivalente al de los sistemas que lo configuran. (Parcero, 2002). Es decir,

Un paisaje es, de esta forma, el producto material y la creación cultural resultante de la acción social cotidiana de comunidades humanas regidas por un determinado sistema de saber-poder, y es a un tiempo tan dinámico y tan perdurable como lo sea éste (Parcero, 2002, p. 16).

2.2.1 Dimensiones del Paisaje

Autores como Parcero (2002), plantean que al analizar de manera estática cualquier hecho o producto social, como un paisaje cultura en un momento específico, es necesario adoptar una estrategia analítica que permita comprenderlo de forma estructurada. Una manera efectiva de abordar este enfoque consiste en descomponer el objeto de estudio (en este caso, el paisaje) en partes, tratando de reconstruirlo a través de secciones que se complementen entre sí y que, al integrarse, restablezcan la totalidad del objeto en cuestión; es ser “conscientes de que se trata de una instrumentación metodológica sólo válida para el proceso de conocimiento y que nunca fue real para las sociedades históricas que se desarrollaron en él” (Ruiz Rodríguez et al. 1998, p. 23, Citado en Parcero, 2002, p. 18). Por lo tanto, dividir el objeto de estudio en partes no implica perder su carácter único o integral, esta división es solo un recurso analítico, que permite comprender mejor el objeto, especialmente cuando se trata de algo complejo. En otras palabras, al descomponer el objeto en secciones para analizarlo, no se pretende reducir su esencia, sino facilitar su comprensión desde una perspectiva estructurada, por lo que, se distinguen cuatro dimensiones del paisaje: la ambiental, económica, sociopolítica y simbólica, que pueden analizarse de manera gradual y complementaria.

2.2.1.1 Dimensión ambiental

La dimensión ambiental corresponde a la primera dimensión del paisaje, esta se refiere al espacio físico o natural que existe antes de la intervención humana, funcionando como una base o materia prima sobre la cual se construye el paisaje a través de la interacción y modificación antrópica. En sí misma, esta dimensión ambiental no constituye un paisaje, ya que (como se ha mencionado anteriormente) un paisaje implica una transformación realizada por actividad humana que le otorga un significado cultural. En este sentido, el paisaje no emerge hasta que el ser humano interviene en el entorno natural alterándolo de diversas maneras, sin embargo, en casos excepcionales, como en algunas culturas del paleolítico temprano, el ambiente podría calificarse como lo hace Felipe Criado (1993) como un “*paisaje ausente*”, siendo en estos casos, la influencia humana sobre el espacio tan mínima que la naturaleza permanece prácticamente inalterada, careciendo de las modificaciones que caracterizan a los paisajes culturales, es decir, un espacio en el que la naturaleza permanecía prácticamente intacta. Así, esta dimensión ambiental establece las bases sobre las cuales se desarrollan las demás dimensiones del paisaje, pero requiere de la intervención humana para convertirse en un paisaje cultural. (Parceró, 2002)

2.2.1.2 Dimensión económica

La dimensión económica del paisaje es la forma más directa y perceptible en que las sociedades humanas modifican su entorno, esta dimensión surge de la necesidad de implementar estrategias sociales que permitan satisfacer las necesidades de subsistencia de una comunidad, como obtención de alimentos, agua y refugio y otros elementos necesarios para supervivencia y crecimiento del grupo. Así, el paisaje no es solo un espacio físico, sino un recurso modificado continuamente por actividades como la agricultura, recolección, construcción de infraestructura para producción y distribución de recursos. En este, la arqueología encuentra un foco central de interés, ya que es lo que deja más huellas materiales, como restos de herramientas, estructuras agrícolas, marcas en el terreno y otros elementos que ofrecen información valiosa. (Parceró, 2002).

En el caso específico de la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, la dimensión económica del paisaje se refleja en los vestigios de actividades extractivas que modelaron el entorno de manera significativa. Este paisaje económico se observa en zonas de extracción intensiva correspondiente a minería, donde el aprovechamiento de recursos naturales para obtener el material deseado ha dejado huellas visibles en el terreno, estas marcas incluyen

canales, fosas, cárcavas que ilustran prácticas extractivas. En Piedras Blancas, estas evidencias son clave para entender como las actividades económicas modificaron el territorio y se integraron en el paisaje, por lo que, la identificación y el estudio de estos elementos permiten profundizar en el uso del espacio desde una perspectiva económica, proporcionando una visión sobre la organización, las tecnologías y las prioridades de las sociedades que interactuaron con este entorno a lo largo del tiempo.

2.2.1.3 Dimensión sociopolítica

En este caso se hace referencia a cómo las interacciones y estructuras socio-políticas de los grupos humanos tienen un impacto en la transformación del paisaje, aunque este impacto no siempre sea directo ni evidente. Así, la dimensión socio-política del paisaje se refiere a las formas en que las sociedades organizan sus relaciones internas (entre individuos dentro de un grupo) y externas (entre diferentes grupos o comunidades). Estas relaciones pueden afectar de manera indirecta el entorno físico, por ejemplo, a través de la construcción de infraestructuras, la organización del espacio urbano o rural, y la distribución de recursos, pero muchas veces estos cambios no son tan visibles o fáciles de identificar como otros factores que modifican el paisaje, como los cambios climáticos o económicos. Así pues, en contextos arqueológicos, esto significa que el estudio del paisaje no solo requiere entender la geografía y topografía, sino también las relaciones sociales y políticas de las sociedades que lo habitaron. (Parcero, 2002).

2.2.1.4 Dimensión simbólica

Esta dimensión del paisaje es considerada la más compleja, ya que se refiere a las formas en que una sociedad conceptualiza e imagina su espacio. No se limita a los aspectos materiales y físicos del paisaje, como los objetos, las construcciones o el uso del territorio, sino que abarca cómo los individuos y grupos sociales atribuyen significado a ese espacio en función de sus creencias, mitologías, religiones, valores y estructuras cognitivas. Es decir, es la interpretación y representación del entorno a través de sistemas simbólicos profundamente arraigados en la cultura de esa sociedad. Por lo tanto, para obtener una visión completa del paisaje de una sociedad, es necesario intentar acceder a las formas simbólicas que dicha sociedad otorgaba a su entorno, ya que estas influían en la organización del espacio y en el sentido que se le daba. Además, es fundamental reconocer que, para comprender estas formas simbólicas del espacio,

debemos alejarnos de nuestra perspectiva moderna y tratar de entender las lógicas cognitivas propias de las sociedades que estamos estudiando. (Parcero, 2002).

Una forma de analizar los aspectos simbólicos en la estructura del paisaje es partir de la premisa de que todo espacio vivido (es decir, cualquier lugar habitado o utilizado por una sociedad) está compuesto por lugares que poseen significados vinculados a la memoria y las tradiciones de ese grupo. Así, estos lugares no solo tienen una función práctica, sino que también pueden ser escenarios de rituales y albergar significados culturales profundos, reflejando una matriz simbólica (Grau, 2021). El estudio de estos aspectos simbólicos se puede abordar a través de un enfoque estructurado en tres fases principales: descripción, deconstrucción e interpretación. En la descripción, se realiza un análisis detallado del paisaje, abarcando tanto los aspectos culturales como los ambientales. Esto implica identificar y documentar las características físicas y culturales del espacio, como estructuras, monumentos, caminos y asentamientos, y cómo se distribuyen en el territorio. En la deconstrucción, se profundiza en el análisis del paisaje, observando los elementos presentes y cómo se relacionan entre sí, descomponiendo el paisaje en sus componentes básicos para entender cómo se organizan y cómo estos elementos contribuyen a su significado. Finalmente, en la interpretación, se busca dar sentido al paisaje, teniendo en cuenta el contexto cultural en el que fue concebido. Aquí, el objetivo es comprender los significados simbólicos que esos elementos tienen para la sociedad que los creó, considerando sus creencias, rituales y valores (Santos et al., 1997, pp. 62–63; citado en Grau, 2021). De este modo, este enfoque no solo permite una comprensión más completa del paisaje, sino que también nos ofrece una ventana para acceder a las cosmovisiones y valores culturales de las comunidades pasadas, enriqueciendo nuestro conocimiento sobre la relación entre las personas y su entorno.

2.3 Maneras arqueológicas de mirar el paisaje: arqueología no invasiva

En la arqueología del paisaje, que amplía su investigación más allá de los sitios o yacimientos arqueológicos específicos para abarcar un análisis de espacios más amplios o regiones naturales, se utiliza un enfoque denominado *arqueología no invasiva*; este enfoque se basa en el análisis de lo visible en superficie -prospección superficial- para la identificación de evidencias materiales de la ocupación humana. Si bien no ofrece las mismas oportunidades que el análisis directo mediante excavación, presenta ventajas significativas. Una de ellas es que no altera el registro arqueológico, el cual permanece protegido bajo las capas de sedimento, evitando así problemas de conservación que surgen al excavar. Además, al ser una técnica de intervención

no destructiva permite abarcar extensas áreas de estudio para la recolección de datos, en contraste con el alcance limitado que presentan los métodos de excavación, debido a su lentitud y la imposibilidad de cubrir grandes superficies, salvo en casos excepcionales. De igual forma, este enfoque facilita identificar y analizar las características físicas de los sitios, su morfología, su función en términos cronológicos y funcionales, así como su relación con el entorno (Grau, 2021). Pero ¿cómo se pueden hacer visibles las evidencias arqueológicas en superficie? Durante décadas, la prospección superficial ha sido la técnica predominante en el estudio del paisaje, dado que este tipo de investigación requiere una aproximación rigurosa al medio físico. En esta técnica -prospección superficial- se pueden emplear diversas estrategias para documentar los vestigios arqueológicos en el espacio, organizándolas en función del punto de observación, lo que a su vez determina la escala de análisis. Así, es posible distinguir tres grupos de técnicas según el punto de observación: a distancia de la superficie, a nivel del suelo o en el subsuelo. En el presente trabajo, nos interesa la Teledetección o detección remota, en la cual la observación se realiza a distancia del suelo, con una escala de análisis muy amplia que depende directamente de la altura con respecto a la superficie terrestre. En este ámbito, se incluyen las tecnologías geoespaciales que permiten la observación remota del territorio desde diversas plataformas y medios. (Grau, 2021).

2.3.1 Fuentes documentales

2.3.1.1 Imágenes satelitales

Una fuente documental importante en la investigación arqueológica y en los estudios del paisaje son las imágenes satelitales, estas proporcionan información detallada sobre la superficie terrestre utilizando diversos sensores que no solo capturan imágenes ópticas -lo que el ojo humano puede ver- sino también otras longitudes de onda como el infrarrojo, que permite detectar aspectos del terreno que no son visibles a simple vista. La variedad de datos obtenidos de los satélites tiene aplicaciones diversas, particularmente valiosas por su capacidad de abarcar grandes áreas geográficas. Esto hace que las imágenes satelitales sean ideales para estudios a escala regional, permitiendo un análisis más amplio y profundo del entorno en el que se trabaja. Además, el uso de estas imágenes puede llevar a la creación de mapas que priorizan áreas para investigaciones arqueológicas o de prospección, teniendo en cuenta la naturaleza del terreno. De esta manera, estos mapas pueden ayudar a evitar problemas comunes en la investigación de campo, como la baja visibilidad del suelo y la difícil accesibilidad. Al planificar mejor las campañas

de campo, se pueden excluir áreas con alta erosión, pérdida de capas del suelo o densa vegetación, lo que optimiza el esfuerzo de investigación (Grau, 2021).

En la actualidad, la disponibilidad de sensores es extensa y accesible como

los satélites Landsat TM o Sentinel que ofrecen imágenes depositadas diariamente en repositorios digitales. Se obtienen imágenes con una resolución de celdilla de 25 metros y han tenido un uso fundamental en diversos entornos de aplicación. Se han empleado como forma de análisis de entornos territoriales y detección de evidencias arqueológicas a gran escala; y también como apoyo en los trabajos de prospección y análisis de datos de paisaje (Grau, 2021, p. 26).

2.3.1.2 LiDAR

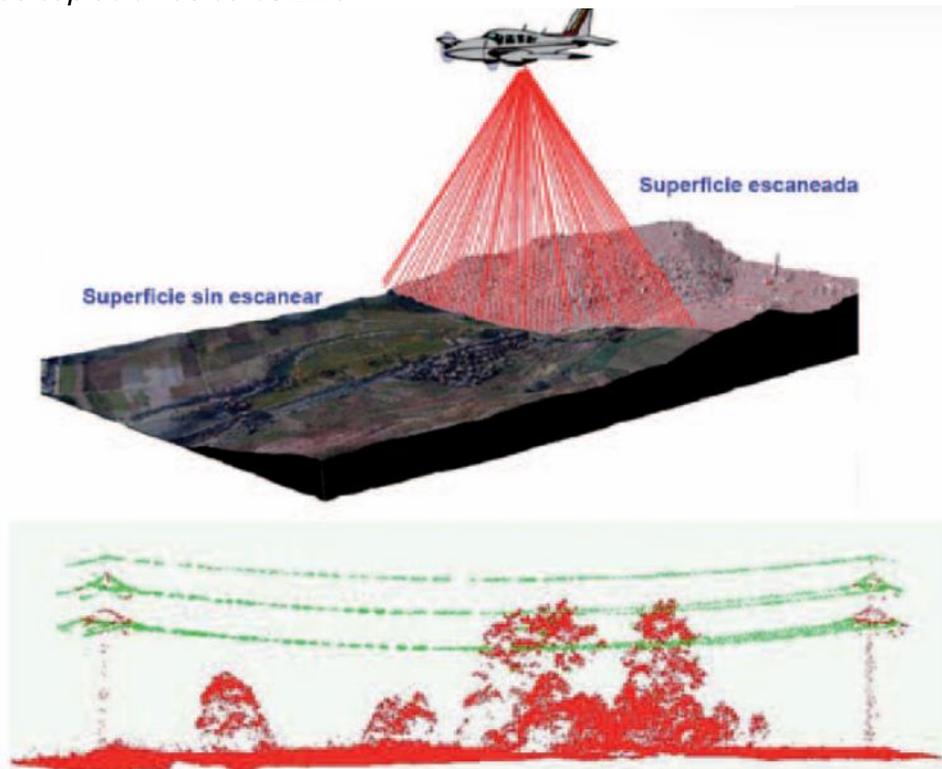
Los datos LiDAR (Light Detection and Ranging) constituyen otra fuente documental importante en la investigación arqueológica y en los estudios del paisaje, ya que son una herramienta fundamental para la caracterización del medio físico, especialmente en lo que respecta a la forma y estructura del terreno a diversas escalas (Grau, 2021). La cartografía mediante LiDAR es un método aceptado para generar información espacial precisa y georreferenciada sobre la forma y las características superficiales de la tierra. Esta técnica de teledetección activa es similar al radar, pero utiliza pulsos de luz láser en lugar de ondas de radio. Generalmente los datos LiDAR se recolectan desde aviones, lo que permite la captura rápida de datos en áreas extensas, sin embargo, también se puede recopilar desde plataformas terrestres, tanto estacionarias como móviles. Esta técnica usada en la modelación topográfica es capaz de producir niveles altos de precisión y densidad de puntos, lo que facilita el desarrollo de representaciones tridimensionales precisas y realistas del terreno. La mayor ventaja de la recolección de datos mediante LiDAR radica en sus altas resoluciones, precisiones en el rango de centímetros y su capacidad para detectar el suelo en terrenos boscosos. (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2012)

Ahora bien, uno de los desafíos frecuentes al usar tecnologías de teledetección para obtener datos de elevación es la dificultad de "ver" a través de la vegetación densa, como en áreas boscosas. Sin embargo, el LiDAR tiene una ventaja: es que genera una gran cantidad de puntos de medición, y aunque solo una parte de estos puntos logra atravesar los huecos en el dosel de los árboles y alcanzar el suelo, es suficiente para proporcionar una representación adecuada del terreno en áreas forestales. Una forma práctica de determinar si el LiDAR

funcionará exitosamente en una zona determinada es observar si es posible ver el cielo a través de los árboles, si se puede hacer esto, es probable que el LiDAR pueda medir el terreno con precisión. (NOAA, 2012).

Figura 15.

Esquema de captación de datos LiDar.



Nota: tomado de: Cuaderno de arqueología del Paisaje (Grau, 2021)

2.3.2 LiDAR y arqueología

Como se había mencionado anteriormente, en la investigación arqueológica es imprescindible una aproximación rigurosa al medio físico para comprender los procesos geomorfológicos, antrópicos y los factores topográficos que pueden influir de diversas formas de la ocupación humana. Así se pueda entender cómo estos factores afectan desde la selección de terrenos hasta las posibilidades de detectar el registro arqueológico en la superficie, es decir, un análisis exhaustivo del terreno es esencial para identificar las dinámicas de ocupación humana y su relación con el entorno físico. Esto puede lograrse mediante el análisis topográfico utilizando tecnología LiDAR, que ofrece diversas posibilidades para la modelación del terreno y de esta manera identificar características tanto topográficas como estructurales relevantes que podrían tener importancia arqueológica, facilitando la localización de evidencias que, de otro modo,

podrían pasar desapercibidas, ya que los estudios arqueológicos no suelen realizarse en terrenos planos y regulares, por el contrario, los sitios donde se llevan a cabo estas investigaciones suelen caracterizarse por una morfología variada, que incluye terrenos con relieves irregulares, pendientes pronunciadas y áreas más bajas y planas atravesadas por elementos como ríos o valles. (Grau, 2021).

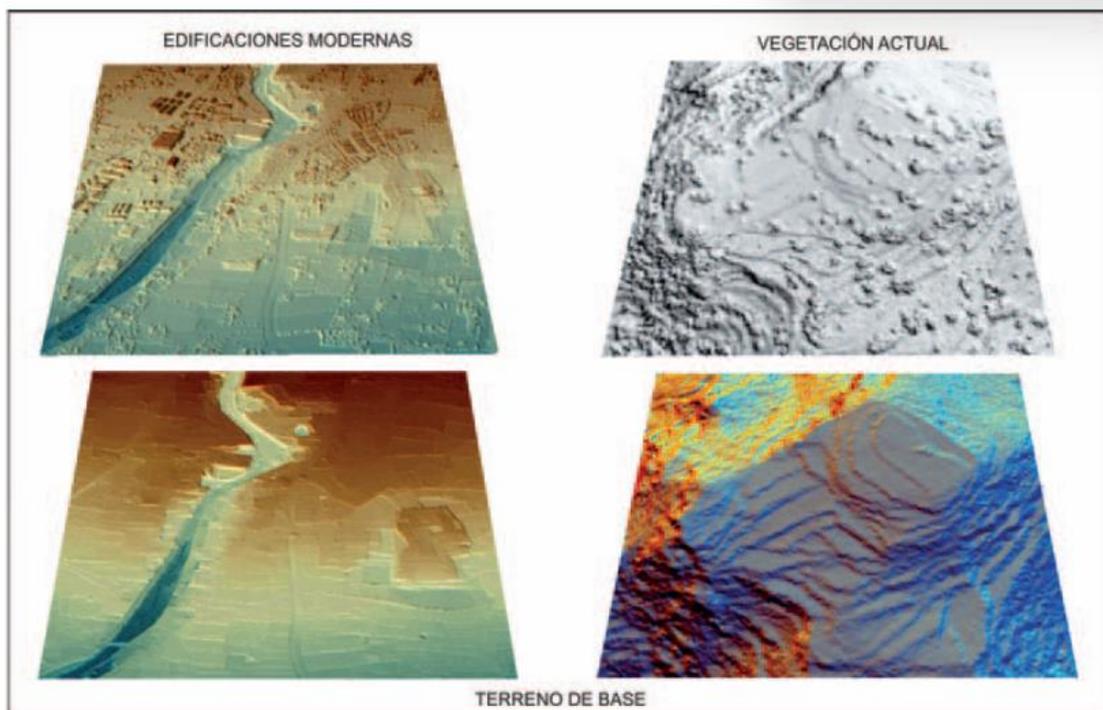
Con los archivos recolectados con tecnología LiDAR se tiene la posibilidad de realizar tareas que van desde las funciones simples, como el filtrado de datos, hasta análisis avanzados mediante el uso de algoritmos o funciones. Así:

Gracias a los procedimientos de filtrado podemos eliminar aquellos datos de la superficie que enmascaran la posibilidad de analizar el suelo original, como edificaciones actuales o vegetación. Eliminando esa información actual es posible formar un modelo digital del terreno (MDT) únicamente del nivel del suelo, es decir, un modelo digital de elevaciones (MDE). Este MDE tiene posibilidades analíticas evidentes, pues puede someterse a tratamiento para realzar selectivamente distintos tipos de relieve y confeccionar imágenes que, una vez interpretadas, ofrezcan información sobre la presencia de elementos arqueológicos en el terreno (Doneus et al., 2008; 2013; Opitz y Cowley, 2013; Cerrillo y López, 2020; citado en Grau, 2021, p. 38).

Es decir, la actividad arqueológica puede beneficiarse significativamente de los datos obtenidos mediante tecnología LiDAR, ya que esta permite filtrar la información eliminando elementos no arqueológicos, como vegetación y construcciones modernas que no son de interés para el estudio. Esto deja visible únicamente el terreno en cuestión, lo que facilita la identificación de posibles sitios arqueológicos, además, el análisis avanzado del terreno por medio de algoritmos y funciones específicas, facilita realizar estudios detallados del paisaje y detectar patrones y características que podrían indicar la presencia de restos arqueológicos ocultos, también la capacidad de generar modelos digitales en tres dimensiones posibilita representar el terreno de manera más precisa, visualizando relieves y estructuras de forma eficiente sin necesidad de excavaciones. Asimismo, LiDAR permite realizar estudios arqueológicos en áreas extensas con rapidez y precisión, reduciendo el tiempo y los costos en comparación con los métodos tradicionales. En definitiva, LiDAR es una herramienta valiosa que optimiza la identificación, análisis y preservación de sitios arqueológicos, facilitando la identificación de evidencia arqueológica que de otro modo podría pasar desapercibida.

Figura 16.

Eliminación de los edificios, izquierda, o la vegetación, derecha, para crear un modelo de MDE con el que analizar el terreno.



Nota: tomado de: Cuaderno de arqueología del Paisaje (Grau, 2021)

2.3.2.1 Análisis de datos LiDAR para uso arqueológico

Cabe destacar que “los datos LiDAR son amplias series alfanuméricas que configuran nubes de puntos que deben ser procesados y analizados para nuestros propósitos” (García & Sánchez, 2018, p.7; Citado en Grau, 2021, p. 39). Para ello, existen varios métodos de análisis de estos conjuntos numéricos y la elección del método adecuado depende de la complejidad de la información obtenida. Entre los programas más utilizados para realizar estos análisis se encuentran: *Fugroviewe*, un software que permite representar conjunto de datos y exportarlo a formatos compatibles con programas SIG; *Lastools*, realiza clasificaciones mediante ArcGIS; *SAGA*, facilita la rasterización y filtrado del suelo y *RVT*, que permite visualizar el relieve de diversas formas. Además, en el análisis de los datos LiDAR se pueden identificar dos niveles distintos. El primero es un nivel básico, enfocado en la generación de imágenes derivadas, ya sea a través de sombreados analíticos o mediante el uso de algoritmos específicos. El segundo nivel, más avanzado, implica un análisis de clasificación destinado a identificar y aislar aquellos

elementos topográficos que podrían estar relacionados con un tipo específico de sitio arqueológico. (Grau, 2021)

Entre las técnicas automáticas de detección y clasificación, en primer lugar, se destaca que la naturaleza numérica de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) generados con datos LiDAR permite programar rutinas informáticas para identificar ciertos sitios arqueológicos o "entrenar" al sistema para localizar tipos específicos de huellas materiales con distintos niveles de precisión. Estas técnicas informáticas se agrupan bajo el término *detección semiautomática* pero sus resultados deben ser evaluados, ya que pueden generar un gran número de falsos positivos. Así, una forma de detección de evidencias se basa en el análisis de imágenes mediante la técnica de *Análisis Basado en Objetos* (Object-Based Image Analysis), que consiste en segmentar el terreno en porciones definidas por criterios morfológicos. La segmentación permite clasificar estas unidades y determinar si son áreas de interés potencial o no. Otro método similar es el *template matching*, que permite buscar patrones específicos dentro de una o varias imágenes. También se pueden emplear técnicas basadas en la transformada de Hough, un conjunto de algoritmos que identifica formas geométricas en las imágenes, lo que ayuda a reconocer regularidades en la morfología antigua del territorio. (Grau, 2021)

2.3.2.2 Visualización de datos LiDAR

Para la arqueología, las técnicas de análisis topográfico desempeñan un papel fundamental al momento de identificar rasgos y estructuras ocultas en el terreno. Entre estas técnicas, el uso de sombreados analíticos se ha vuelto común para la detección de elementos arqueológicos. Ya que:

Esta técnica consiste en simular la iluminación del terreno desde distintos puntos con el objetivo de destacar pequeños relieves topográficos. En los últimos tiempos hemos asistido a la publicación de propuestas de algoritmos de realce de los MDT, con interesantes posibilidades de aplicación y uso. Muchos de estos algoritmos se basan en la comparación de posiciones topográficas (realmente celdas de un MDE) con una simplificación o regularización de su entorno (Cerrillo y López, 2020; Citado en Grau, 2021, p.40)

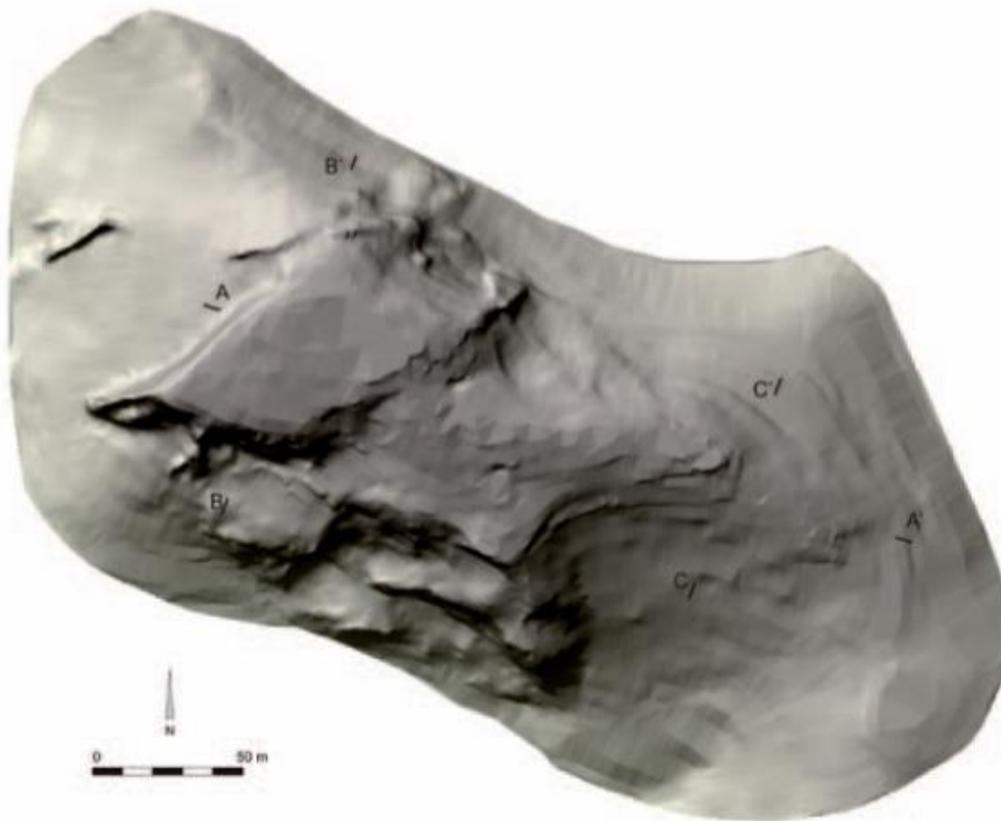
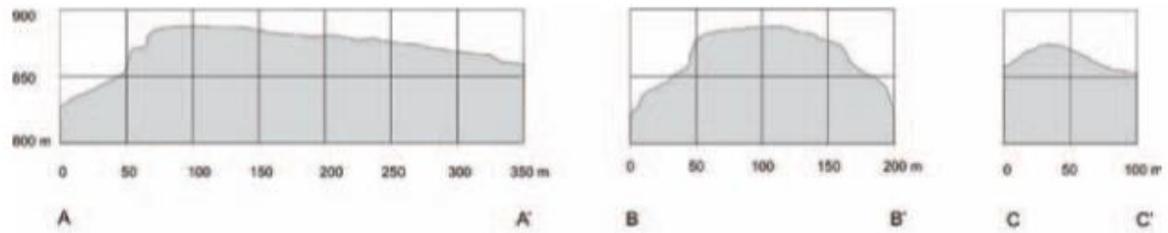
Entre las herramientas de visualización encontramos el software libre *Relief Visualization Toolbox (RTV)*, desarrollado por el *Institute of Anthropological and Spatial Studies* del ZRC SAZU

(Eslovenia) que permite experimentar con diferentes formas de representar datos topográficos. Este software ofrece una variedad de procedimientos y funciones que permiten visualizar el relieve del terreno de manera más clara y detallada, lo cual es útil para identificar rasgos arqueológicos o analizar las características del terreno, algunas de las funcionalidades que ofrece este programa son: *Relief shading (Sombreado de relieve)*: función que ilumina la superficie del modelo con una luz directa que es constante para todo el conjunto de datos. Permite variar el ángulo de incidencia y el azimut de la luz, lo que ayuda a resaltar las características del terreno, como los relieves y las sombras; *Sky-View Factor (Factor de visión del cielo)*: Esta técnica ayuda a identificar áreas planas, crestas y colinas que reciben más luz solar, mientras que las depresiones aparecen más oscuras debido a su menor exposición a la luz; *Slope Severity (Gradiente de la pendiente)*: Calcula la inclinación del terreno y puede expresarse como un porcentaje o en grados. Esta funcionalidad es útil para evaluar la pendiente del terreno y funciona especialmente bien cuando se combina con la función de sombreado; *Trend Removal (Eliminación de tendencias)*: Este procedimiento separa las características locales de pequeñas escalas de las formas más grandes del paisaje, permitiendo un análisis más claro de las características específicas del terreno sin la influencia de las formas de paisaje más amplias; *Solar Insolation (Insolación solar)*: Esta función cartografía la cantidad de energía solar que recibe la superficie, lo que puede ser útil para entender la distribución de la luz solar en el terreno; *Derived Hillshade (Derivados de sombreado desde diferentes direcciones)*: Realiza un análisis de componentes principales (PCA) que resume la información del sombreado desde varias direcciones a través de una transformación matemática. Los tres primeros componentes pueden representarse como un compuesto RGB, proporcionando una visualización más rica y completa del relieve. En conjunto, estas funcionalidades del RVT permiten a los usuarios analizar y representar datos topográficos de manera más efectiva, lo que puede ser especialmente útil en estudios arqueológicos y de gestión del paisaje. (Grau, 2021).

2.3.2.3 Visualización del terreno - Aplicaciones

Figura 17.

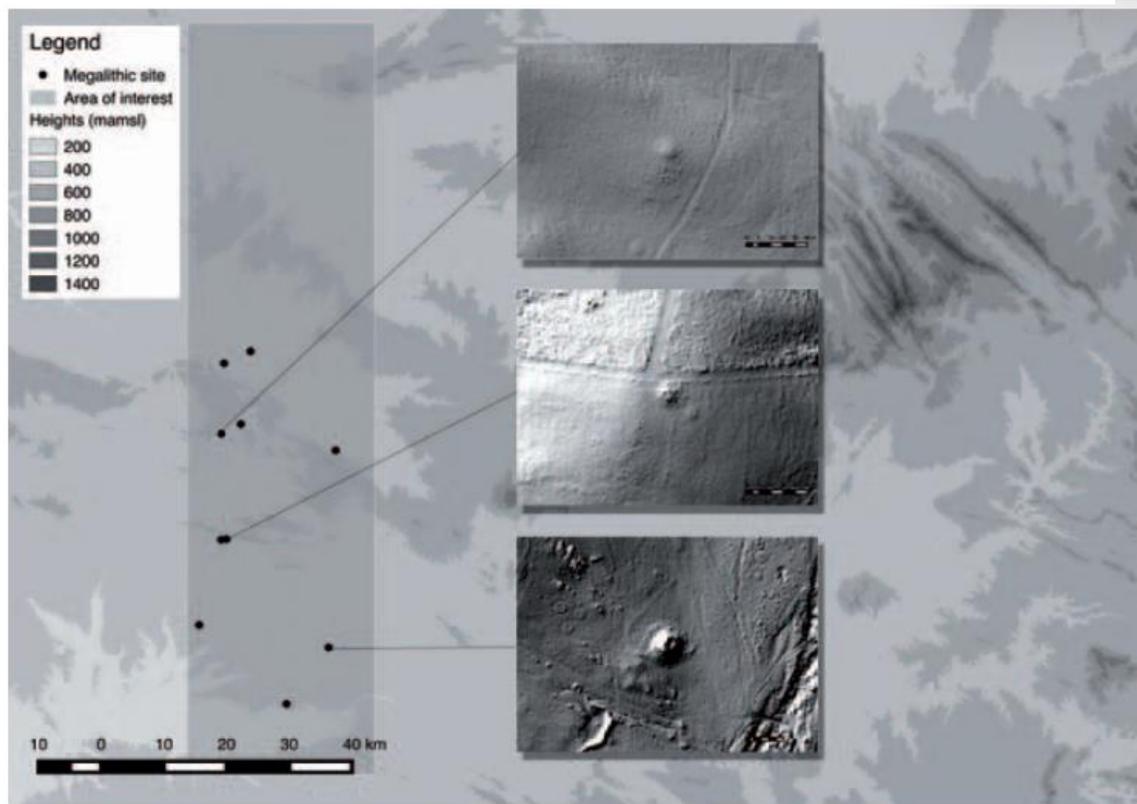
Caracterización topográfica del terreno.



Nota: tomado de: Cuaderno de arqueología del Paisaje (Grau, 2021)

Figura 18.

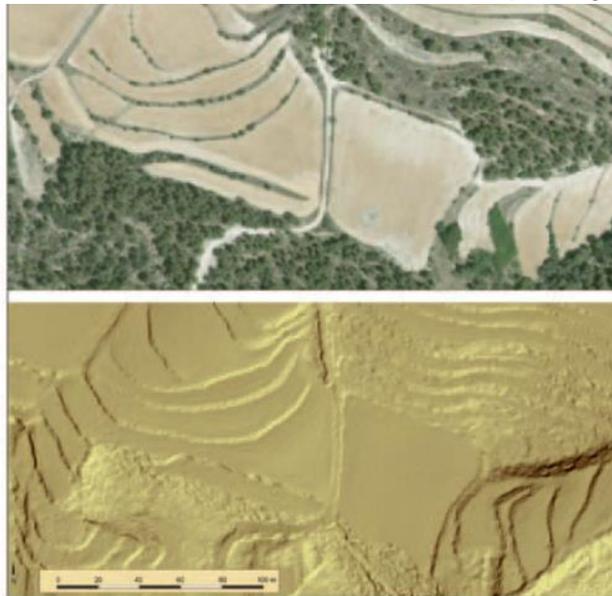
Localización de entidades arqueológicas. Identificación de sitios arqueológicos



Nota: tomado de: Cuaderno de arqueología del Paisaje (Grau, 2021)

Figura 19.

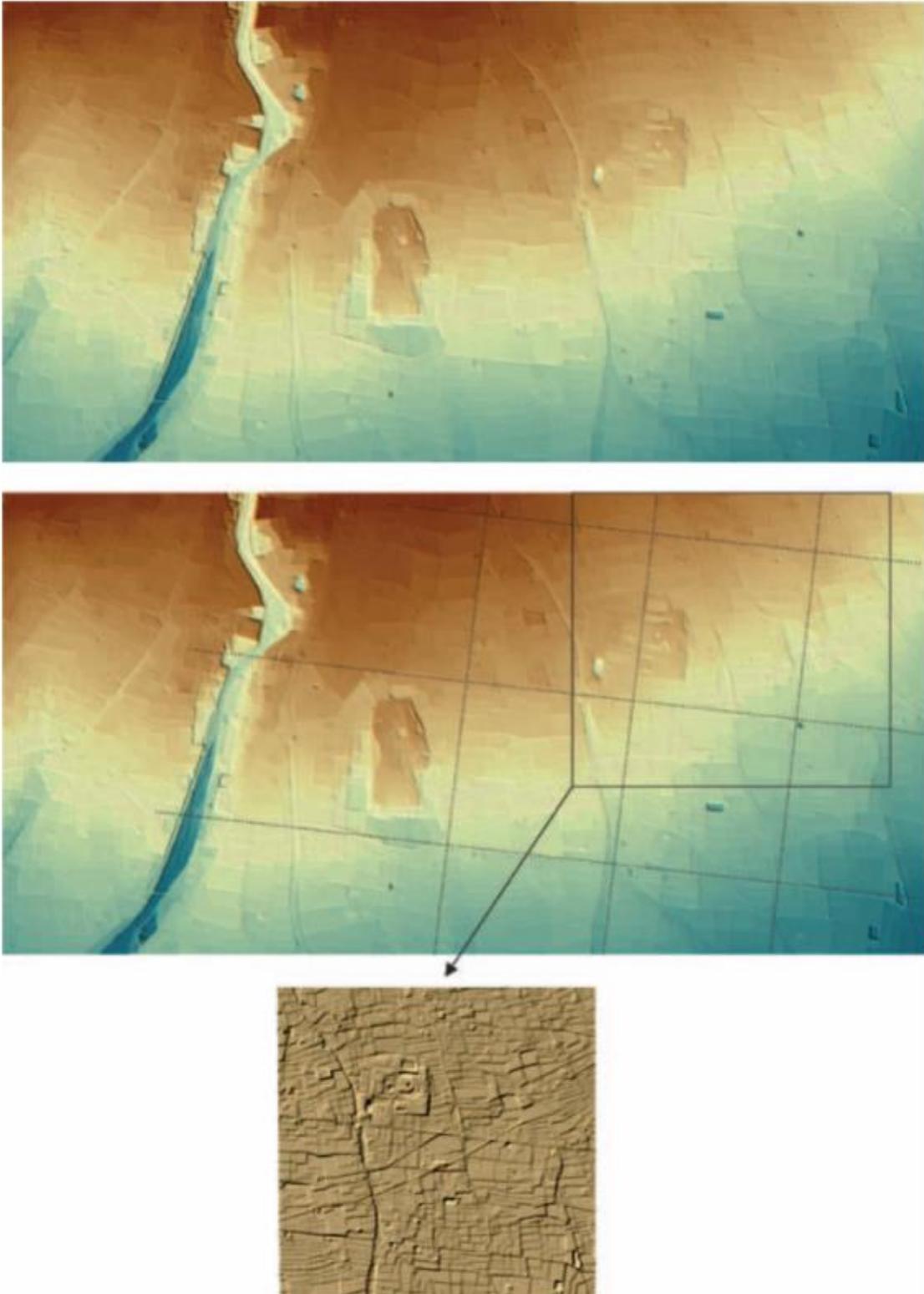
Caracterización topográfica del entorno de un asentamiento arqueológico



Nota: tomado de: Cuaderno de arqueología del Paisaje (Grau, 2021)

Figura 20.

Identificación de obras de infraestructura, como las vías o parcelarios.



Nota: tomado de: Cuaderno de arqueología del Paisaje (Grau, 2021)

3 LiDAR. Caso cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas. Contexto minero aventaderos - Chorro Clarín.

Para el año 2018 la corporación Arví y la empresa Batimetría S.A.S, efectuaron un contrato con el objetivo de realizar un levantamiento altiplanimetrico y la generación de un ortofoto a partir de tecnología LiDAR, para un área de 2500 hectáreas las cuales corresponden al área de influencia del parque Arví en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, con el fin de tener la modelación del terreno en los polígonos a intervenir y de esta forma contar con elementos suficientes para la planificación de intervenciones futuras. La colección de datos de LiDAR se llevó a cabo con el modelo de sensor de LiDAR Rigl LMS-Q650 en una aeronave HL-2899.

Con estos datos, la arqueóloga Liliana Gómez presento un informe ante el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) del estudio del contexto minero denominado Aventaderos que corresponde a 33 hectáreas ubicado el sector conocido como Chorro Clarín en área de influencia del parque Arví, en el corregimiento de Santa Elena – Medellín, con el que luego de realizar una evaluación general de los alcances de LiDAR se llega a la conclusión como se mencionó anteriormente que los resultados del estudio no fueron satisfactorios, ya que hubo diferencias en los datos obtenidos por la variación en la cobertura vegetal.

Por tal razón, a partir de la exploración de las posibilidades y el potencial de la tecnología LiDAR en contextos arqueológicos, específicamente hablando del contexto arqueológico minero denominado Aventaderos, surge el interrogante y se busca analizar un posible “por qué” las condiciones contextuales del área de estudio, es decir, la variabilidad de la cobertura vegetal, impidieron la realización de una cartografía efectiva con tecnología LiDAR con propósitos arqueológicos o por lo menos así es mencionado por los encargados del estudio. En consecuencia, se realizó un análisis de los datos obtenidos con LiDAR por la empresa Batimetría S.A.S. diferente al presentado por la arqueóloga Liliana Gómez en 2019 y cuyos resultados difieren.

Así pues, tras conversación personal con el ingeniero Forestal Iván Raigosa García, quien revisó y analizó los datos primarios obtenidos con tecnología LiDAR por parte de la empresa Batimetría S.A.S.; llega a la conclusión de que, la altura de vuelo del avión sobre la superficie de LiDAR fue demasiado alta y sobrepaso las capacidades del sensor de LiDAR, haciendo que la intensidad¹ de este fuera bastante baja y no tuviera una buena penetración del dosel de bosque.

¹ La intensidad hace referencia cuando el retorno del láser es capturado, por lo tanto, la fuerza de ese retorno también es capturada. Estos valores representan que tan bien los objetos reflejaron la longitud y onda de la luz usada por el sistema laser.

De esta manera, se encontró que el número de puntos y de pulsos por metro es similar (16 y 18 pulsos y puntos por metro cuadrado respectivamente), lo que sugiere, según Raigosa, que la intensidad de los pulsos debido a la elevada altura de vuelo fue baja y no fue suficiente para atravesar el dosel del bosque y la cobertura para generar múltiples echopulsos en una superficie como la del bosque de coníferas.

Según la calibración del equipo suministrada por la empresa Batimetría S.A.S (2018) en su informe de Levantamiento LiDAR para un polígono con área de 2500HA, en el área de influencia del Parque Arví en la totalidad de la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas, la altura de vuelo para una reflexión del 80% de la energía es de 1500 metros en una superficie blanca, sin embargo, esto se reduce considerando la cobertura vegetal de *Cupressus lucistanica* y Pino Patula del área que además es irregular. Según Batimetría S.A.S. (2018), la altura máxima de mediada de bosques de coníferas es de 540 metros at pulse repetition rate (pr) de 240kHz, 600 metros a pr de 180 kHz y 750 metros a pr de 100 kHz, para este caso, la empresa Batimetría no especifica en su informe del levantamiento del polígono el PRR.

Aunque para el ingeniero es posible obtener datos para la generación de modelos de terreno (DTM), modelos digitales de superficie (DSM) o incluso modelos de altura de dosel (CHM) se pierde la capacidad de tener un DTM de altísima calidad y la capacidad del equipo de detectar la microtopografía y en este caso, restos arqueológicos.

Para llegar a la conclusión anterior el ingeniero Raigosa tuvo que reprocesar la nube de puntos de LiDAR usando el paquete lidR (Roussel et al 2022) en R 4.1.2, (R core Team 2021). usando la función *LAScatalog processing engine* para segmentar la nube puntos en archivos más pequeños y de esta manera procesar los datos de forma más eficiente (Roussel et al 2021); la clasificación de puntos del suelo se realizó usando la función *classifyground* en combinación con el filtro morfológico *progressive* con tamaños de ventana de 3, 12 y 3 y una diferencia límite de elevación 0.1 y 1.5 (Roussel et al 2021, Keqi Zhang et al 2003). El modelo de elevación de terreno (DTM) fue generado usando la función *grid_terrain*, el algoritmo TIN con el paquete LiDR con un tamaño de píxel de 0,2 5 m.

Para determinar la altura del vuelo sobre el suelo, Raigosa utilizó el software ArcGis PRO, luego tomó las líneas de vuelo en formato .kml y las convirtió a formato. lyrx para extraer la altitud de la línea de vuelo, posterior a esto, las líneas fueron transformadas a formato raster (.tif) con el campo elevación como valor de celdas de 30 metros. Finalmente, la herramienta *raster calculator* fue utilizada para calcular la diferencia de altitud entre la línea de vuelo y el modelo digital de terreno (DTM) para calcular la altura de vuelo sobre el suelo para cada celda. Como producto se obtuvo que la altura de vuelo varió de los 3418 metros sobre el nivel del mar a 3611 metros sobre

el nivel del mar (figura 21). Basado en el DTM generado, la altura de vuelo sobre la superficie varió desde los 846 metros a los 1292 metros, con una media de 1062 metros y una desviación estándar de 81 metros (figura 22). Específicamente, en el lote Aventaderos la variación de la altura fue alrededor de 1100 a 1145 metros sobre la superficie.

Figura 21
 Mapa. Altura del vuelo sobre la superficie (m).

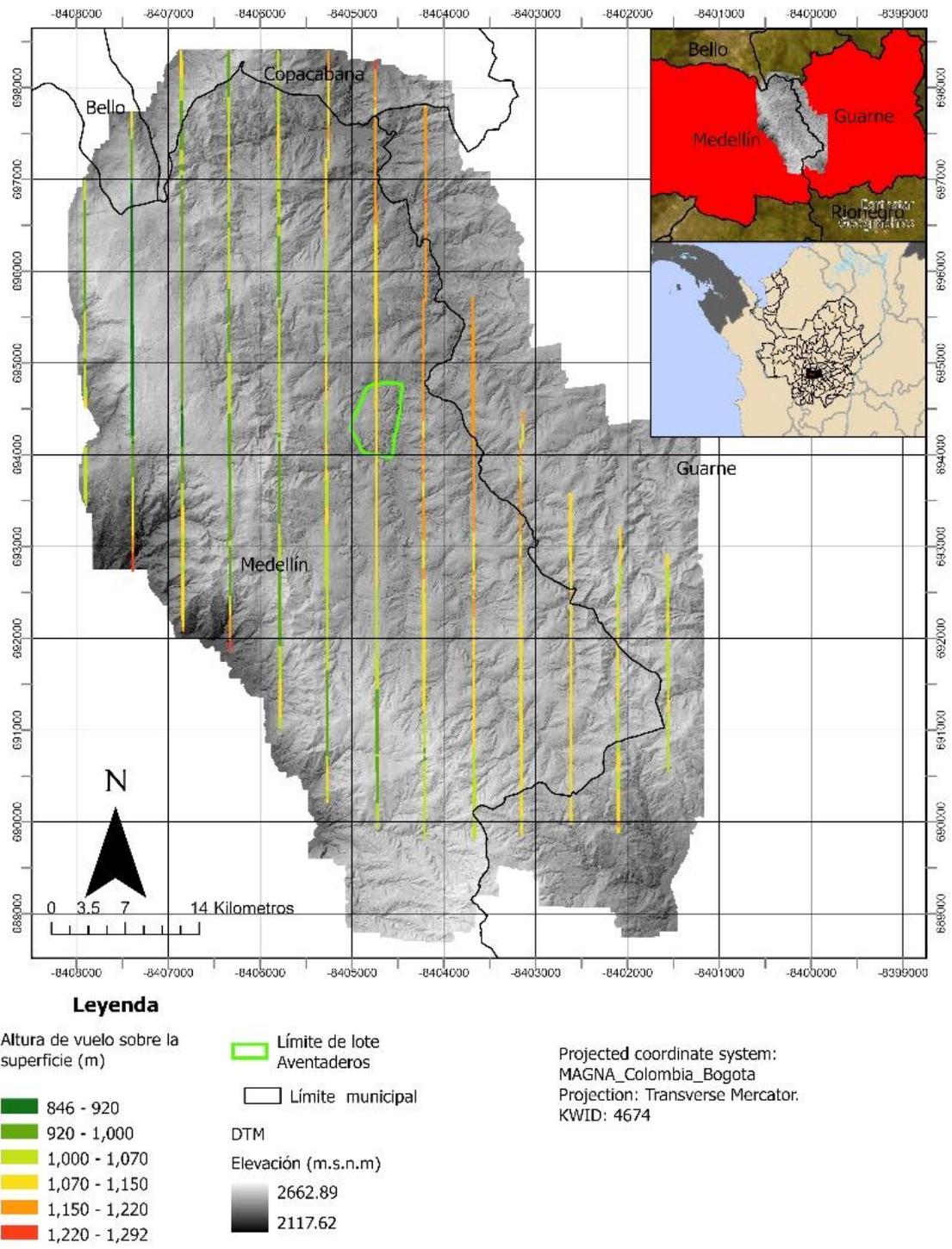
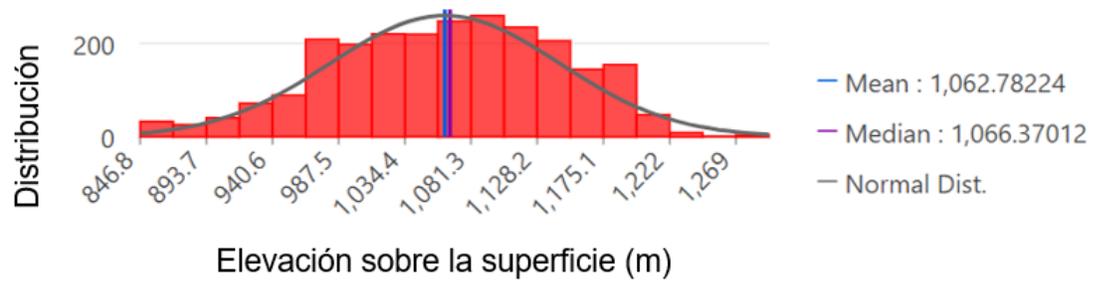


Figura 22.

Distribución de altura de vuelo sobre la superficie.



4. Recomendaciones para uso de LiDAR en zonas arqueológicas

El uso de la tecnología LiDAR ha revolucionado la forma en que se realizan investigaciones arqueológicas, permitiendo la identificación, análisis y documentación de sitios arqueológicos con un nivel de detalles sin precedentes, además su capacidad de capturar datos topográficos de alta resolución, incluso en áreas cubiertas por vegetación densa, ha transformado la forma en que se estudia el paisaje arqueológico permitiendo visualizar vestigios que, de otro modo, podrían permanecer ocultos. No obstante, para aprovechar al máximo las capacidades de LiDAR en el contexto arqueológico, es esencial seguir ciertas pautas que optimicen su uso, teniendo en cuenta tanto las limitaciones del entorno como los objetivos específicos de la investigación. Por lo que, a continuación, se exponen algunas recomendaciones claves para utilizar esta tecnología de manera eficaz en estudios arqueológicos:

4.1 Planificación del proyecto LiDAR:

Antes de implementar un proyecto con tecnología LiDAR, es crucial definir con claridad los objetivos arqueológicos específicos, es necesario determinar qué tipo de información se desea obtener: ¿se busca detectar estructuras o mapear el paisaje? ¿El propósito es identificar canales, caminos o rastros de ocupación humana? La respuesta a estos interrogantes determinará las especificaciones técnicas requeridas, como la resolución del escaneo y el tipo de plataforma (aérea, terrestre o basada en drones) a emplear. Además, es importante planificar la temporada adecuada para la captura de datos, considerando factores como la vegetación y las condiciones climáticas.

4.1.1 Contexto geográfico y ambiental

Seleccionar el entorno de trabajo, ósea, el contexto geográfico y ambiental del área a estudiar es otro factor clave al momento de realizar la planificación, así zonas con densa cobertura vegetal, como los bosques, requerirán una planificación cuidadosa respecto al tipo de sensores LiDAR y el momento de captura de datos; en zonas cubiertas por vegetación baja o pastizales, el LiDAR puede ser un poco más efectivo, pero en zonas de alta cobertura forestal, la densidad de puntos que alcanza el suelo puede reducirse, lo que afectaría la calidad de los resultados, en este sentido, para zonas donde existen estaciones, se recomienda planificar la captura de datos durante estaciones en las que la vegetación esté menos densa (cómo invierno

o durante la estación seca), esto maximiza la cantidad de pulsos de láser que llegan al suelo, mejorando la resolución del modelo digital del terreno. En áreas con vegetación baja o maleza, la elección de un sensor LiDAR de mayor resolución será esencial para detectar características más sutiles del paisaje.

Por otro lado, en zonas del trópico, donde no existen estaciones definidas como en regiones templadas, el uso de tecnología LiDAR para investigaciones arqueológicas presenta desafíos de vegetación durante todo el año, por lo que, para optimizar el uso de esta tecnología en estos contextos, es fundamental ajustar la planificación y los métodos de captura de datos de manera que se adapten a las condiciones del trópico.

4.1.2 Consideración de la vegetación y cobertura forestal

En los trópicos, donde la vegetación es especialmente densa, el mayor reto del uso de LiDAR radica en la capacidad limitada de los pulsos láser para penetrar el dosel forestal. A pesar de ello, el LiDAR ha demostrado ser eficaz al detectar el suelo a través de los espacios entre la vegetación (gaps o huecos en el dosel). Para maximizar esta capacidad, es recomendable:

- **Elegir sensores LiDAR de alta densidad de puntos**, que emitan un mayor número de pulsos por metro cuadrado, aumentando la posibilidad de que algunos lleguen al suelo incluso en áreas de vegetación densa.
- **Realizar capturas durante la época más seca o de menor crecimiento vegetal** dentro del ciclo anual, lo que, aunque no sea una estación claramente diferenciada, puede coincidir con una ligera reducción en la densidad del follaje, permitiendo una mayor penetración de los pulsos de luz.
- **Evaluar la vegetación específica del área**, como la densidad de los árboles, arbustos y la existencia de vegetación baja (como helechos y maleza). Los árboles de gran altura, típicos de selvas tropicales, pueden obstruir más el paso de los pulsos láser, por lo que se debe ajustar la captura para minimizar esta interferencia.

4.2 Elección del equipo y la plataforma LiDAR

La selección del equipo LiDAR adecuado es esencial para obtener resultados óptimos, para áreas extensas o cubiertas por vegetación densa, se recomienda el uso de plataformas aéreas como aviones o drones equipados con sensores LiDAR, que permiten la cobertura de

grandes extensiones en menor tiempo. En contextos más reducidos o para detalles específicos, el uso de LiDAR terrestre o estacionario también puede ser beneficioso. Además, es importante elegir un equipo capaz de generar datos de alta densidad de puntos para mejorar la precisión en la detección de anomalías arqueológicas.

4.2.1 Plataformas Aéreas: aviones, helicópteros y drones

Para áreas extensas o de difícil acceso, las plataformas aéreas son la opción más eficiente y permiten cubrir grandes extensiones en menos tiempo, lo que resulta especialmente valioso cuando se estudian paisajes arqueológicos amplios. Los aviones y helicópteros equipados con sensores LiDAR pueden recolectar millones de puntos de datos en un solo vuelo, generando mapas tridimensionales de alta resolución que muestran la topografía del terreno y los posibles elementos arqueológicos ocultos bajo la vegetación.

Dentro de las plataformas aéreas, los drones han ganado una popularidad creciente debido a su bajo costo, maniobrabilidad y flexibilidad. En terrenos donde la cobertura forestal es densa o donde la accesibilidad es limitada, los drones permiten realizar capturas a baja altitud, lo que aumenta la densidad de los puntos recolectados y mejora la precisión de los resultados. Además, los drones son una excelente opción para áreas más pequeñas donde se requiere un nivel de detalle más alto, como en la exploración de sitios arqueológicos específicos o sectores previamente identificados.

4.2.2 Plataformas terrestres: vehículos y estaciones fijas

En contextos donde se necesita obtener un nivel de detalle excepcional, como en áreas reducidas o sitios arqueológicos específicos, las plataformas terrestres pueden ser la opción ideal. LiDAR montado en vehículos todoterreno permite capturar datos en rutas predeterminadas, siendo útil para cartografiar algunos tipos de caminos o estructuras lineales. También es posible usar estaciones fijas o trípodes con sensores LiDAR en proyectos que exigen una gran precisión, como en la documentación de monumentos, edificios o zonas arqueológicas urbanas. Estas plataformas terrestres o móviles permiten obtener una mayor densidad de puntos en áreas específicas, lo que es crucial para la identificación de elementos arqueológicos más pequeños o estructuras complejas, como cimientos ocultos o recintos fortificados.

Por lo que, la elección del equipo y la plataforma LiDAR dependerán en gran medida de la escala del proyecto, las condiciones ambientales y los objetivos arqueológicos. La correcta combinación de plataformas aéreas y terrestres, junto con sensores LiDAR de alta densidad de puntos, garantizará que se obtengan resultados precisos que faciliten la detección de elementos arqueológicos, mejoren la comprensión de los paisajes y optimicen la investigación arqueológica de manera integral.

4.3 Procesamiento y filtrado de datos

Una vez que los datos LiDAR han sido recolectados, el siguiente paso es su procesamiento. Para maximizar el beneficio de estos datos, es necesario utilizar software avanzado de procesamiento de datos LiDAR. Este software es capaz de realizar varias funciones clave, como:

- **Filtrado de la vegetación y elementos modernos:**

El software especializado en LiDAR, como Relief Visualization Toolbox (RVT), Lastools o Fugroviewer, permite filtrar elementos no deseados, como árboles, arbustos o edificios modernos, que pueden enmascarar las estructuras arqueológicas bajo el suelo. Esto permite a los arqueólogos trabajar con un modelo digital del terreno "limpio" de interferencias, lo que facilita la identificación de rasgos arqueológicos como cimientos, fosos o caminos.

- **Análisis de relieve y sombreado analítico:**

Herramientas como el sombreado de relieve permiten resaltar pequeñas variaciones en la topografía que podrían ser indicativas de estructuras arqueológicas. Los algoritmos de sombreado generan diferentes perspectivas del terreno al simular cómo incide la luz en las diferentes pendientes y elevaciones, lo que facilita la identificación de estructuras escondidas.

4.4 Integración con otras técnicas y datos

El LiDAR es una herramienta extremadamente poderosa, pero su capacidad para ofrecer información detallada puede potenciarse aún más cuando se combina con otras tecnologías y fuentes de datos. Algunas de las técnicas que se integran de manera efectiva con LiDAR en investigaciones arqueológicas incluyen:

- **Imágenes satelitales y ortografía histórica:**

Imágenes satelitales ofrecen una visión a gran escala del paisaje arqueológico y permiten identificar áreas que merecen ser estudiadas con mayor profundidad. Las imágenes de alta resolución, junto con la información obtenida por LiDAR, permiten realizar análisis comparativos del cambio en el terreno a lo largo del tiempo. Esto es particularmente útil para identificar sitios arqueológicos que han sido alterados por actividades modernas o que han permanecido ocultos bajo vegetación.

Ortografía histórica proporciona una referencia importante para comparar cómo ha cambiado un sitio arqueológico a lo largo de décadas. Al superponer datos LiDAR modernos con imágenes históricas, los arqueólogos pueden rastrear patrones de uso del suelo, como cambios en la agricultura, la urbanización o el crecimiento de la vegetación que podrían haber ocultado sitios arqueológicos.

- **Prospección geofísica:**

Las tecnologías como el georradar (GPR) y la magnetometría complementan el análisis LiDAR al ofrecer una visión del subsuelo. Mientras que LiDAR se enfoca en la topografía superficial, las técnicas geofísicas permiten a los arqueólogos identificar características enterradas, como estructuras subterráneas o depósitos arqueológicos. Esta combinación es especialmente valiosa en sitios donde la excavación no es factible o está limitada por razones de conservación.

- **SIG (Sistemas de información geográfica):**

El uso de plataformas SIG permite integrar datos LiDAR con otras capas de información espacial, como mapas geológicos, información histórica, datos sobre recursos hídricos o datos de uso del suelo. Esto ayuda a los arqueólogos a analizar un sitio dentro de su contexto ambiental más amplio y a identificar patrones de ocupación humana relacionados con el paisaje natural.

4.5 Validación de resultados y trabajo de campo

Aunque el análisis mediante LiDAR permite detectar patrones y anomalías que podrían estar asociadas a sitios arqueológicos, la interpretación de estos datos no puede darse por concluida sin una verificación in situ. La validación en campo es un paso crítico que garantiza que los hallazgos remotos se correspondan con características reales del terreno. Esto es

particularmente relevante en zonas de densa vegetación, donde la resolución de los datos LiDAR puede verse afectada por la cobertura forestal.

- **Confirmación de hallazgos**

La validación de resultados en campo permite asegurar que las anomalías detectadas por el LiDAR no sean simplemente artefactos creados por el sistema, como errores en la recolección de datos o ruido en la señal. Por ejemplo, una elevación topográfica que podría parecer una estructura artificial podría ser simplemente una formación geológica natural. El trabajo de campo permite a los arqueólogos distinguir entre los elementos antrópicos (creados por el ser humano) y los naturales.

- **Contextualización arqueológica**

El trabajo en terreno también proporciona la oportunidad de evaluar el contexto arqueológico más allá de lo que puede revelar el análisis remoto. Los datos LiDAR pueden señalar estructuras ocultas o sutiles cambios en la topografía, pero la prospección arqueológica permite contextualizar esos elementos.

Finalmente, El uso de LiDAR en zonas de alta cobertura forestal, como las regiones tropicales, ofrece oportunidades sin precedentes para la arqueología, pero también presenta desafíos únicos. A pesar de las dificultades planteadas por la vegetación densa y las condiciones climáticas, el uso adecuado de LiDAR, combinado con otras tecnologías y técnicas de procesamiento avanzadas, puede revelar sitios arqueológicos ocultos y proporcionar una visión más detallada de la interacción entre los humanos y su entorno en estas áreas complejas.

El futuro de la arqueología en zonas tropicales dependerá cada vez más de la integración de tecnologías avanzadas como LiDAR, junto con el desarrollo continuo de nuevas herramientas y métodos para mejorar la resolución y precisión de los datos capturados. Esto permitirá a los arqueólogos continuar descubriendo y preservando el patrimonio arqueológico en áreas remotas y de difícil acceso, ampliando nuestro conocimiento del pasado humano en contextos geográficos diversos.

5. Otros casos de teledetección en Colombia

5.1 Aplicaciones de la teledetección en la Sierra Nevada De Santa Marta, Colombia

Históricamente las investigaciones arqueológicas han sostenido la idea de que los bosques tropicales representan un obstáculo significativo para el desarrollo de la civilización, particularmente en aspectos como la agricultura intensiva, la organización política estatal y la urbanización, además, la capacidad de los arqueólogos para evaluar de manera exhaustiva la extensión y densidad del uso y ocupación del suelo en entornos de densa vegetación ha sido tradicionalmente limitada, y en ocasiones, el acceso a los lugares resulta imposible. Sin embargo, hoy en día, algunos arqueólogos han propuesto modelos alternos que reconocen la sofisticación económica y sociopolítica de sociedades antiguas que habitaron entornos tropicales. El uso de herramientas de teledetección, como el LiDAR aerotransportado, ha sido clave en la arqueología de zonas densamente boscosas, permitiendo cambios teóricos y metodológicos significativos al replantear concepciones tradicionales sobre las ecologías tropicales y los grupos humanos que las habitaron, al hallarse cada vez más evidencias de transformaciones intensivas del paisaje mediante sistemas complejos de asentamientos antiguos desafiando perspectivas tradicionales que durante mucho tiempo consideraron estas regiones como desprovistas de complejidad sociopolítica. (Rodríguez, Giraldo, Mazuera, Burbano & Figueredo, 2023).

En el caso de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), hasta hace poco, la mayoría de los modelos teóricos sobre el uso y la ocupación del territorio consideraban que las antiguas sociedades Tairona estaban concentradas en centros principales de viviendas y ceremoniales, rodeados por un entorno natural prístino y en gran medida intacto, reduciendo la investigación arqueológica y del patrimonio cultural a los centros monumentales conocidos, como Teyuna – Ciudad Perdida y Pueblito. Sin embargo, la investigación de Rodríguez et al. (2023) ofrece una visión sin precedentes de la SNSM, revelando el grado en que las antiguas sociedades transformaron el paisaje antes de la llegada de los europeos. Utilizando tecnología de teledetección como LiDAR aéreo, combinado con escaneo láser terrestre (TLS) y fotogrametría, el estudio ha modelado la posible ubicación de asentamientos y áreas cultivables bajo el denso dosel forestal. Los hallazgos revelan un extenso paisaje antropogénico, donde los sitios previamente interpretados como centros regionales se convierten en parte de sistemas de asentamientos integrados que transformaron la región. Entre los sitios estudiados se encuentran Teyuna – Ciudad Perdida y Congo – Ciudad Antigua, dos de los más de 250 asentamientos identificados en la SNSM, que pertenecían a entidades políticas independientes, pero los cuales

compartían rasgos socioculturales. La arquitectura y las evidencias arqueológicas de ambos sitios muestran similitudes y diferencias, convirtiéndolos en dos de los restos arquitectónicos más importantes del patrimonio prehispánico de Colombia.

Figura 23.

Localización de Congo – Ciudad Antigua (A) y Ciudad Perdida (B)



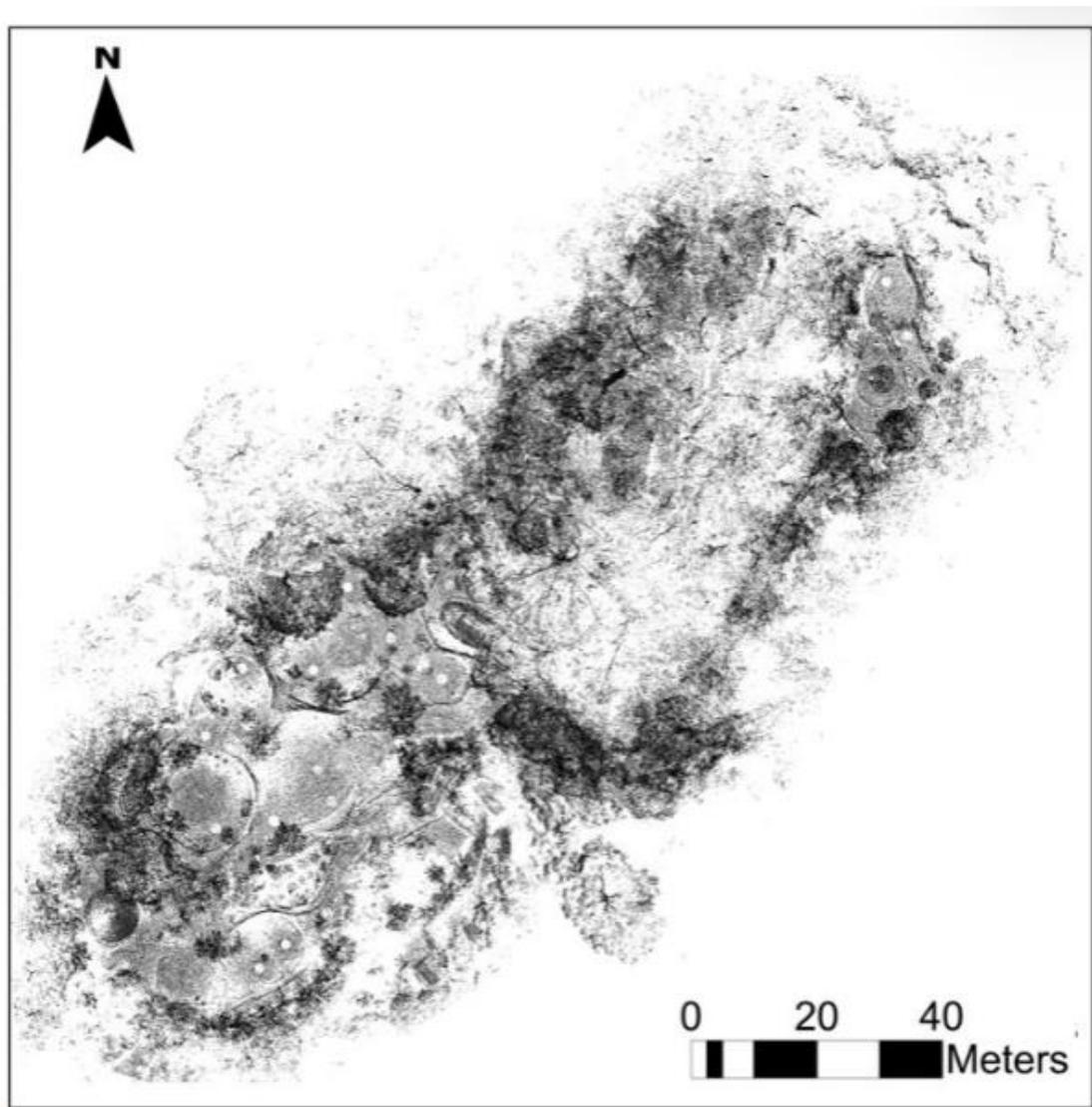
Nota: tomado de: Beyond visualization: remote sensing applications in prehispanic settlements to understand ancient anthropogenic land use and occupation in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia (Rodríguez et al.,2023).

De este modo, Rodríguez et al. (2023) con esta investigación intenta demostrar hasta qué punto las técnicas de teledetección como el LiDAR pueden revelar información sobre la distribución y características de los asentamientos antiguos que no han sido plenamente entendidos mediante métodos arqueológicos tradicionales. Así, el LiDAR aéreo permitió documentar entre 96 y 112 hectáreas de ocupación en la cuenca del Buriticá; por otro lado, el escaneo láser terrestre (TLS) proporcionó datos precisos sobre estructuras de mampostería en Congo-Ciudad Antigua, identificando más de 5,000 m² de áreas ocupadas. Así mismo, la fotogrametría aplicada en Congo-Ciudad Antigua permitió diferenciar y clasificar áreas de

arquitectura (como estructuras de piedra) y vegetación, utilizando segmentación RGB, un proceso de clasificación basado en la información de color de las imágenes, lo que facilitó la distinción entre materiales como piedra y vegetación en función de sus características cromáticas.

Figura 24.

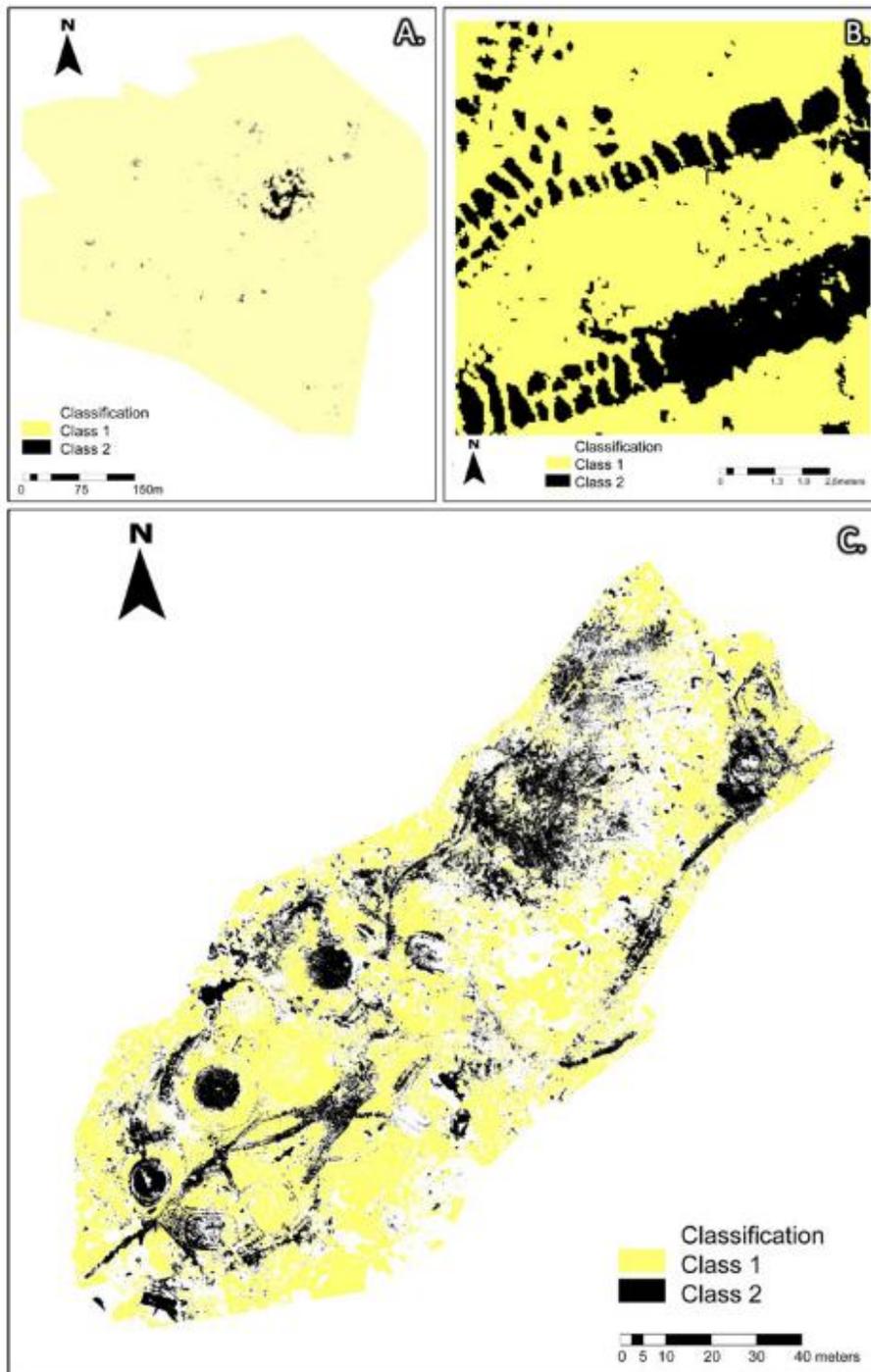
Modelo general de Congo-Ciudad Antigua basado en TLS



Nota: tomado de: Beyond visualization: remote sensing applications in prehispanic settlements to understand ancient anthropogenic land use and occupation in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia (Rodriguez et al.,2023).

Figura 25

Clasificación supervisada de fotogrametría (imágenes construidas utilizando ArcMap); (B) clasificación supervisada de TLS; (C) vectorización raster de la clasificación TLS



Nota: tomado de: Beyond visualization: remote sensing applications in prehispanic settlements to understand ancient anthropogenic land use and occupation in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia (Rodriguez et al.,2023).

Finalmente, el estudio ofrece una visión renovada sobre la relación entre los Tairona y su entorno, destacando la interacción con un paisaje de gran complejidad. En lugar de concebir los asentamientos como concentrados, se presenta un modelo de asentamientos dispersos a través de amplias extensiones del macizo, complementados por vastos campos cultivables. Estos espacios fueron profundamente alterados por diversos tipos de bosques primarios, adaptados a una amplia variedad de altitudes. Además, este enfoque permite repensar la organización urbana en la SNSM y reconsiderar cómo las modificaciones antropogénicas del paisaje pueden ser entendidas, abriendo la posibilidad de imaginar una visión distinta sobre la complejidad social de los Tairona

5.2 Documentación digital de ecosistemas Kársticos

En cuanto a la documentación digital de ecosistemas Kársticos, se encuentra la investigación presentada por López (2020) en la que pretende proponer polígonos y figuras de conservación para un Paisaje Kárstico ubicado al oriente de la cordillera central colombiana, en la cuenca de Rio Claro, Antioquia, ya que, este paisaje alberga un significativo potencial arqueológico, evidenciado en depósitos y diversas expresiones de arte rupestre, así como una notable geodiversidad y biodiversidad; además, la formación Kárstica en esta zona se desarrolla sobre un manto de roca caliza, cuya *disolución* de la roca genera formas particulares del relieve, entre las que se incluyen cuevas, cavernas y otras estructuras geológicas. Asimismo, en la zona coexisten diversos intereses y expectativas sobre el uso del territorio, como los grandes proyectos minero-industriales, el desarrollo de economías campesinas y los procesos de conservación ambiental, lo que genera conflictos en la forma en que se utiliza y gestiona el espacio.

Así, por ejemplo, aunque en algunos sitios la operación turística se lleva a cabo con una perspectiva de conservación por parte de organizaciones ambientales, ciertas prácticas y la falta de control han resultado en el deterioro de sectores de los depósitos arqueológico, esto se debe en parte, a las visitas esporádicas de algunos turistas y pobladores de la región, quienes, intencional o inadvertidamente, contribuyen al deterioro. Las afectaciones al arte rupestre son especialmente preocupantes, ya que estos daños no solo provienen de la actividad humana, sino también de procesos naturales, entre ellos, destaca la meteorización química, un proceso que descomponen las rocas debido a reacciones químicas y la acción biológica, alterando las superficies rocosas. Este deterioro combinado amenaza la integridad de los sitios arqueológicos, subrayan la necesidad de estrategias de gestión y conservación mas efectivas que incluyan tanto

la educación de los visitantes como el monitoreo continuo de las condiciones del lugar. (López, 2020).

Ante eso, López (2020) propone desarrollar un sistema de información para la gestión del patrimonio. Este sistema se enfoca en conocer detalladamente las condiciones actuales de los bienes patrimoniales para planificar y hacer seguimiento a las acciones de conservación e intervención, la propuesta incluye una caracterización exhaustiva del patrimonio, utilizando tanto métodos de documentación y registro tradicionales como técnicas avanzadas de última generación; esto implica la aplicación de tecnologías como la restitución digital de datos espaciales tridimensionales de alta resolución. A través de estas imágenes en 3D, que utilizan modelos matemáticos de nubes de puntos con coordenadas cartesianas, de los que se pueden realizar análisis detallados que son útiles tanto para la investigación arqueológica como para estudios de conservación.

Esta propuesta abarca diferentes escalas de análisis, desde el paisaje completo hasta detalles específicos, como un panel de arte rupestre, ósea, se trata de una iniciativa para mejorar la documentación y gestión del patrimonio mediante herramientas tecnológicas avanzadas, adaptadas a las necesidades específicas de los objetos de conservación. Por lo que:

La información levantada a manera de repositorio digital de los SAK (sitios arqueokársticos), tiene fines estrictamente científicos y divulgativos y fue entregada a las entidades que han patrocinado el desarrollo de este modelo. La información para los investigadores y el público en general está disponible web www.espeleoarqueologia.co/espeleoarqueologia, se busca que esta sea la línea base para la administración del programa de protección patrimonial que derive de la declaratoria de área arqueológica protegida. (López, 2020, p.264)

La documentación digital se llevó a cabo mediante un proceso de fotogrametría con drones, capturando una serie de imágenes de alta resolución que permiten la creación de una ortofoto detallada y un modelo tridimensional del terreno. Por lo que, para la captura de imágenes se utilizaron drones marca DJI de las referencias Phantom y Mavic 2 Pro, que tiene cámaras de alta resolución y las prestaciones suficientes para la captura de imágenes 4k en resolución de 24 MP, en las cuales se obtiene una resolución real de hasta 3cm por pixel. El procesamiento de imágenes, la fotogrametría y la planeación de vuelos se hizo con el ecosistema ofrecido por PIX 4D, posteriormente se llevó la información a ArcGis para la realización de cartografía temática. Los ficheros se guardaron en formato SHP. (López, 2020, p. 266)

Por lo que, gracias a las imágenes capturadas mediante fotogrametría, se hace posible el análisis en detalle varias características del terreno. Por un lado, se pueden estudiar las formas de la superficie, lo que incluye la manera en que el terreno está modelado, como las colinas, valles o llanuras; por otro lado, el análisis de los colores y texturas de las coberturas permite identificar como se ven diferentes partes del terreno, lo cual puede indicar diferentes tipos de vegetación o superficies. Esta información facilita la generación de datos útiles, como: pendientes, modelos de elevación, curvas de nivel y análisis de cuencas visibles. Siendo estos análisis de gran ayuda para la gestión del patrimonio, ya que proporcionan una comprensión detallada del entorno físico, lo que es crucial para planificar actividades de conservación, evaluar riesgos y tomar decisiones informadas sobre cómo proteger y manejar los sitios. (López, 2020).

Figura 26.

Ortofoto obtenida mediante tecnología dron.



Nota: tomado de: Arqueología y gestión del patrimonio del paisaje Kárstico de Rio Claro – Oriente antioqueño, andes centrales colombianos (López, 2020)

Además, de la fotogrametría, se emplearon otras técnicas para la documentación digital, como fotografías en 360° y el escaneo con luz estructurada de espectro infrarrojo; también se llevó a cabo un levantamiento utilizando un equipo Laser Scan O LiDAR, que “hace captura más

precisa de las nubes de puntos ya que obtiene cada registro de una toma específica con un láser, esta técnica siendo más costosa permite obtener modelos de gran calidad que se pueden complementar con el modelo fotogramétrico” (López, 2020, p. 269)

Figura 27

Fotogrametría de media resolución 0.07 mm.



Nota: tomado de: Arqueología y gestión del patrimonio del paisaje Kárstico de Río Claro – Oriente antioqueño, andes centrales colombianos (López, 2020)

Figura 28

Documentación de lienzo rupestre en resolución de 0,7 m.m.



Nota: tomado de: Arqueología y gestión del patrimonio del paisaje Karstico de Rio Claro – Oriente antioqueño, andes centrales colombianos (López, 2020)

Figura 29

Andamiaje montado para la documentación fotogramétrica del arte rupestre



Nota: tomado de: Arqueología y gestión del patrimonio del paisaje Kárstico de Rio Claro – Oriente antioqueño, andes centrales colombianos (López, 2020)

Finalmente, el escaneo y documentación digital de lugares patrimoniales mediante tecnologías como la fotogrametría y los modelos 3D ofrecen múltiples beneficios para la conservación, incluyendo:

- **Monitoreo de cambios a lo largo del tiempo:** tener un registro detallado del estado actual de un sitio permite comparar con datos futuros para detectar cambios, ya sean por causas naturales (erosión, meteorización) o humanas (turismo, vandalismo). Esto facilita la identificación temprana de deterioros o alteraciones, lo que es esencial para tomar medidas preventivas o correctivas.
- **Preservación Digital:** en caso de que un sitio sufra daños irreparables, tener un modelo digital detallado asegura que su información se conserve para futuras generaciones. Esto es crucial para el estudio, la investigación y la educación, incluso si el sitio físico ya no existe o está inaccesible.
- **Planificación de intervenciones de conservación:** los modelos digitales permiten simular diferentes escenarios de intervención sin afectar el sitio real. Esto ayuda a planificar de manera más efectiva las acciones de conservación, minimizando riesgos y optimizando recursos.
- **Accesibilidad y educación:** la posibilidad de explorar sitios patrimoniales a través de modelos 3D proporciona acceso virtual a investigadores, estudiantes y el público en general, promoviendo una mayor comprensión y apreciación del patrimonio sin necesidad de visitar físicamente el lugar, lo que también reduce el impacto sobre el sitio.
- **Apoyo en casos de desastres:** en situaciones de desastres naturales o conflictos, los registros digitales pueden ser fundamentales para la reconstrucción o restauración de sitios patrimoniales afectados.

Referencias

- Aristizábal, E., & Yokota, S. (2008). Evolución geomorfológica del valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa. *Boletín de Ciencias de la Tierra*(24), 5 - 18. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/9268>
- Batimetría S.A.S. (2018). *Levantamiento LiDAR para un polígono con área de 2500HA, en el área de influencia del Parque Arví en la totalidad de la Cuenca Alta de la Quebrada Piedras Blancas*. Medellín.
- Botero, S. (1999). Gente antigua, piedras blancas, campos circundados. Vestigios arqueológicos en el altiplano de Santa Elena (Antioquia, Colombia). *Boletín de Antropología*, 13(30), 287 - 305. doi:<https://doi.org/10.17533/udea.boan.337542>
- Botero, S. (2017). Historia y Arqueología en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas. En U. d. Antioquia, *Los rostros de Antioquia* (págs. 86 - 117). Medellín: Universidad de Antioquia (Ed). Obtenido de https://issuu.com/muua/docs/los_rostros_de_antioquia_para_issuu
- Botero, S. (2020). *Oro corrido, mazamorras y conciertos en la provincia de Antioquia. Minería colonial para arqueólogos e interesados*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Botero, S., & Norberto, V. (1995). Algunas reflexiones sobre el registro cerámico arqueológico en Antioquia. *Boletín de Antropología*, 9(25), 100 - 118. doi:<https://doi.org/10.17533/udea.boan.343761>
- Colombia, Instituto Colombiano de Antropología e Historia. (2019) Resolución de 2019 (febrero 6): por la cual se declara un Área Arqueológica Protegida de orden nacional en el departamento de Antioquia.
- Criado, F. (1993). Límites y posibilidades de la Arqueología del Paisaje. *SPAL 2 revista de Prehistoria y Arqueología*, 7 - 55.
- Fernández, M., & Grana, L. (noviembre de 2015). Arqueología ambiental: La relación entre las culturas preteritas y los cambios ambientales. *Ciencia Hoy*, 25(146), 15-20. Obtenido de <http://cienciahoy.org.ar/2015/12/arqueologia-ambiental-la-relacion-entre-las-culturas-preteritas-y-los-cambios-ambientales/>
- Gómez, A. N. (2011). Hacia una arqueología del paisaje en Colombia: reflexiones necesarias. *Boletín de Antropología. Universidad de Antioquia*, 25(42), 231 - 254. doi:<https://doi.org/10.17533/udea.boan.11232>
- Gómez, L. (2017). *Estudio de contexto minero ubicado en el lote 125 del año 5 del plan integral de manejo forestal de EPM - Piedras Blancas - Santa Elena - Medellín*.
- Gómez, L. (2019). *Estudio arqueológico del contexto minero de "aventaderos". Chorro clarín - Piedras Blancas - Corregimiento Santa Elena*.

- Grau, I. (2021). *Cuaderno de arqueología del Paisaje. Introducción al análisis espacial de las sociedades del pasado*. Alicante: Publicacions de la Universitat d'Alacant.
- López Bonilla, L.G. (2020). Arqueología y gestión del patrimonio del Paisaje Kárstico de Río Claro – Oriente antioqueño, Andes Centrales Colombianos [tesis de maestría, Universidad de Antioquia]. Biblioteca Carlos Gaviria Díaz Medellín
- Mazurek, H. (2006). *Espacio y territorio Instrumentos metodológicos de investigación social*. La Paz: Fundación PIEB.
- National Oceanic And Atmospheric Administration (NOAA). (2012). *LiDAR 101: An Introduction to LiDAR Technology, Data, and Applications*. Obtenido de <https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/lidar-101.pdf>
- Obregón, M., Gómez, L., & Cardona, L. (2005). Mineros ricos y mineros pobres. Tecnología y cultura material de un contexto minero entre los siglos XVII y XIX en la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas (Antioquia). *Boletín de Antropología*, 19(36), 10 - 32. doi:<https://doi.org/10.17533/udea.boan.6914>
- Orejas, A. (1995 - 1996). Territorio, análisis territorial y arqueología del paisaje. *Studia historica. Historia antigua*(13 - 14), 61 - 68. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=106377>
- Orejas, A. (1995). Arqueología del paisaje: de la reflexión a la planificación. *Archivo español de arqueología*, 68(171 - 172), 215 - 224. doi:<https://doi.org/10.3989/aespa.1995.v68.423>
- Parceró, C. (2002). *La construcción del paisaje social en la edad del hierro del noroeste ibérico*. Fundación Ortegália. Obtenido de <https://digital.csic.es/handle/10261/14882>
- Pérez, C. A., & Ramírez, J. (2018). Estación forestal experimental de Piedras Blancas: Introducción del informe realizado por los autores en el año 1969. *Revista de Extensión Cultural*(61), 12 - 23. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69261>
- Piazzini, C. E. (2006). Arqueología, espacio y tiempo: una mirada desde Latinoamérica. *Arqueología Suramericana*, 2(1), 3 - 25. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10495/25305>
- Posada, J., Roldán, G., & Ramírez, J. (2000). Caracterización fisicoquímica y biológica de la calidad de aguas de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 48(1), 59 - 70. Obtenido de http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442000000100008&lng=en&tlng=es
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.1.2). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>
- Rodríguez, D., Giraldo, S., Mazuera, E., Burbano, A., & Figueredo, E. (2023). Beyond Visualization: Remote Sensing Applications in Prehispanic Settlements to Understand Ancient Anthropogenic Land Use and Occupation in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Latin American Antiquity*, 34, 821 - 841. doi:<https://doi.org/10.1017/laq.2022.91>

-
- Roldán, G., Posada, J. A., & Gutiérrez, J. C. (2001). *Estudio limnológico de los recursos hídricos del Parque de Piedras Blanca*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Obtenido de <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/46>
- Roussel, J.-R., Auty, D., & Boissieu, F. D. (2022). *lidR* (Version 4.0.0). Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://cran.r-project.org/package=lidR>
- Roussel, J.-R., Goodbody, T., & Tompalski, P. (2021–2022). *The lidR package*. Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://cran.r-project.org/package=lidR>
- Santos, G. (1986). Investigaciones arqueológicas en el "oriente" antioqueño. El sitios de los salados. *Boletín de Antropología*, 6(20), 45 - 80. doi:<https://doi.org/10.17533/udea.boan.337574>
- Zhang, K., Chen, S.-C., Whitman, D., Shyu, M.-L., Yan, J., & Zhang, C. (2003). A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), 872–882. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.810682>