

Metodología para la identificación de zonas con potencial concentración de oro (Au) sobre cauces fluviales, aplicando técnicas fotogramétricas, levantamiento geomorfológico y cartografía geológica.

Diego Fernando Salazar Manrique

Wladimir Pineda Alhucema

Trabajo de grado para optar al título de Geólogo

Director

Andrés Mauricio Cáceres Bottia

Geólogo M. Sc

Codirector

Jose Pedro Mora Ortiz

Geólogo M. Sc

Universidad Industrial de Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

*Los humanos al igual que las rocas
Tenemos características de nuestro ambiente de formación.
Los humanos a diferencia de las rocas
Tenemos la capacidad de elegir la mejor composición para nuestra persona
Y ser en consecuencia, un mejor ambiente para las personas que nos rodean.
Así que todo lo que soy
no es más que el aporte de cada persona que se ha cruzado
en este camino que llaman vida.
Especialmente a mi madre Magdalena, mi padre Gilberto,
mis hermanos Rubén y Jorge,
y a mi mejor amigo German David.
Por ser y estar siempre, gratitud infinita.
Diego Salazar*

Este logro está dedicado especialmente a mis padres Marcos y Elisa, quienes con su infinito amor han moldeado el ser humano que soy y seré.

A mi esposa Luz Angela, compañera de dichas y sacrificios, complemento de mi ser.

A mi hijo Valentino, que aún no ha visto la luz del mundo y ya se transformó en el mío.

A mis hermanos Wilmar, Marcos y Darinel que de tan diversas formas han sido un respaldo incommensurable.

Wladimir Pineda Alhucema

Agradecimientos

Nuestro más profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología, por la oportunidad de formarnos como profesionales íntegros de provecho para la sociedad.

Un especial agradecimiento a Javier González y Julieth Duarte quienes a través de su Comercializadora Internacional (CI) aportaron logística y fueron la conexión directa con algunos de los mineros artesanales del municipio de Suratá y nos brindaron su apoyo en las diferentes visitas a campo.

A nuestro director de proyecto, el profesor Andrés Mauricio Cáceres por su paciencia, por brindarnos su conocimiento y respaldo durante el desarrollo de esta práctica, y quién ha brindado su confianza y apoyo para nuestra formación académica, profesional y personal.

Al profesor José Pedro Mora, codirector del proyecto, por compartir su conocimiento, su apoyo y su tiempo.

A la comunidad de Suratá por su hospitalidad y al grupo de mineros artesanales por compartir amablemente sus conocimientos ancestrales.

A todos nuestros compañeros, amigos y a nuestros profesores de la universidad que de una u otra manera han aportado su grano de arena a nuestra construcción profesional.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	16
1 Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos	18
2 Planteamiento del Problema y/o Justificación	19
3 Localización de la Zona De Estudio	22
4 Marco Teórico	24
4.1 El Oro	24
4.2 Extracción Artesanal de Oro Aluvial.....	26
4.3 Formación de Placeres.....	30
4.4 Variables Claves Para la Formación de Placeres Aluviales	32
4.4.1 Pendiente.....	32
4.4.2 Geomorfología	33
4.5 Fotogrametría y Fotogrametría Digital.....	39
4.5.1 Terminología Para "Drone"	41
4.5.2 Fotogrametría con VANT	42
5 Marco Geológico	43
5.1 Geología Regional	43
5.2 Geología Local	47
5.2.1 Formación Simití	47

5.2.2	Formación La Luna.....	48
5.2.3	Formación Umir (Colón-Mito Juan).....	48
6	Metodología.....	50
6.1	Primera Etapa: Fase de Pre-Campo.....	50
6.1.1	Planificación del Vuelo.....	51
6.2	Segunda Etapa: Trabajo de Campo.....	55
6.3	Tercera Etapa: Análisis, Digitalización e Interpretación de Resultados.....	57
6.3.1	Procesamiento de las imágenes aéreas.....	57
6.3.2	Parámetros para el análisis multicriterio.....	65
6.3.3	Análisis Multicriterio.....	70
6.4	Cuarta Etapa: Generación y Socialización de Productos.....	72
7	Resultados.....	73
7.1	Trabajo de Campo.....	73
7.1.1	Interacción con los mineros.....	73
7.1.2	Geomorfología del cauce del río California.....	74
7.2	Trabajo de Oficina.....	79
7.2.1	Productos drone.....	79
7.2.2	Productos GIS – Análisis Multicriterio.....	80
7.3	Correlación de resultados en campo.....	82
8	Discusión.....	83
8.1	Observaciones de campo.....	83
8.2	Observaciones del levantamiento fotogramétrico.....	85
8.3	Observaciones del procesamiento en GIS.....	85

8.4	Observaciones del análisis multicriterio.....	87
8.5	Observaciones de la comprobación en campo.....	88
9	Conclusiones.....	89
10	Recomendaciones	90
	Referencias Bibliográficas	92

Lista de Tablas

Tabla 1. Coordenadas zona de estudio.....	22
Tabla 2. Modelo simplificado que relaciona las características del oro aluvial con el medio ambiente (Tomado y modificado de Giusti, 1986, en Macdonald, 2007).	31
Tabla 3. Características del Autel Evo II Pro 6k, especificaciones de la aeronave y de la cámara (Autel Robotics, 2020).....	51
Tabla 4. Parámetros de vuelo establecidos.	52
Tabla 5. Clasificación de pendientes según la favorabilidad para la acumulación de depósitos. 65	
Tabla 6. Clasificación de los radios de curva según la favorabilidad para la acumulación de depósitos.	66
Tabla 7. Clasificación de los ángulos de curva según la favorabilidad para la acumulación de depósitos.	66
Tabla 8. Distribución de pesos ponderados para cada criterio.....	70
Tabla 9. Concordancia entre los valores de los puntos cateados en campo y la clasificación en el mapa de favorabilidad de formación de depósitos aluviales.	83

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio, tramo del Río California demarcado en el recuadro rojo.	23
Figura 2. Producción total de oro a nivel mundial. Tomado de: Phillips & Powell, 2015.....	25
Figura 3. Esquema que muestra la técnica del bateo. Tomado y modificado de: Toscano, et al. 2012.....	27
Figura 4. Producción de mineros de subsistencia en rangos. (Basado en: Agencia Nacional de Minería, 2021).....	29
Figura 5. Requerimientos básicos para la formación de cualquier depósito mineral. (Tomado y modificado de McQueen, 1997, en Macdonald, 2007).....	30
Figura 6. Barra de punto de agrandamiento que se forma a lo largo del banco convexo de un canal de meandro. Tomado de Smith & Beaukes (1983) en Robb (2005).....	34
Figura 7. Río trenzado con sus depósitos sedimentarios no consolidados (Vista de planta). Tomado y modificado de Purposegames.com (2022).....	35
Figura 8. Separación de flujo y atrapamiento de partículas por barras en el lecho de un río (Vista de perfil). Tomado y modificado de Mcdonald (2007).....	36
Figura 9. Influencia del guijarro en la trayectoria del flujo (Vista de planta). Tomado y modificado de Macdonald (2007).	36
Figura 10. Influencia de cantos rodados en la trayectoria del flujo (Vista de perfil). Tomado y modificado de Mcdonald (2007).....	37
Figura 11. Remolino frente a un saliente de orilla, que causa la "captación" de sedimentos fluviales (Vista de planta). Tomado y modificado de Smirnov (1982).	38

Figura 12. Marmitas formadas en el lecho rocoso (Vista de perfil). Tomado y modificado de Toscano, et al., (2012).....	38
Figura 13. Esquema de las corrientes de fondo en la confluencia de ríos (Vista de planta). Tomado y modificado de Mackkaviév en Mcdonald (20007).	39
Figura 14. Flujo de trabajo para la planificación de estudios de fotogrametría (Tomado y modificado de Dering et al., 2019).	41
Figura 15. Distancia de muestreo del suelo (GSD) en función de los parámetros de la cámara y la distancia al sujeto. Tomado de Dering, et al., 2019.....	43
Figura 16. A)Ubicación del distrito minero Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental de Colombia). (Tomado de Mantilla et al., 2013). B) Localización de la zona de estudio y el DMVC en el mapa geológico regional. (Tomado y modificado de INGEOMINAS, (1977).45	
Figura 17. Localización de la zona de estudio en el mapa geológico local, Plancha 110-Pamplona. (Tomado y modificado de INGEOMINAS, 1977).	49
Figura 18. Metodología para el desarrollo del proyecto.....	50
Figura 19. Aeronave y cámara del UAV Autel Evo II Pro 6k. Tomado de auteldrones.com (Sitio oficial de Autel Robotics).	52
Figura 20. Plan de vuelo elaborado en la aplicación Autel Explorer para el área de estudio.....	53
Figura 21. Predicción de las condiciones meteorológicas para la zona de estudio según la aplicación UAV Forecast. A) Pronóstico horario para la mañana del día seleccionado. B) Condiciones meteorológicas específicas para las 10 am. C) Perfil del viento para las 10 am. ...	54
Figura 22. Diagrama esquemático que resume un flujo de trabajo utilizado en Agisoft Metashape Professional. Tomado y modificado de Over, J.R. et al (2021).....	57

Figura 23. Cámaras importadas ubicadas geográficamente sobre la zona de estudio. Se observan las fotos tomadas durante el vuelo autónomo (azul) y las fotos tomadas de forma manual (rojo).
..... 58

Figura 24. Parámetros establecidos para la orientación de las imágenes aéreas. 59

Figura 25. Cámaras exitosamente orientadas (azul) y cámaras no orientadas (blanco), se observa que la orientación tuvo problemas hacia las zonas externas el polígono de vuelo debido a las alturas topográficas presentes. 59

Figura 26. Nube de puntos de paso generada tras la orientación de las imágenes aéreas. 60

Figura 27. Parámetros establecidos para la creación de la nube de puntos densa. 61

Figura 28. Nube de puntos densa generada a partir de la nube de puntos dispersa. 61

Figura 29. Parámetros utilizados para la generación del modelo digital de elevaciones..... 62

Figura 30. Modelo digital de superficies obtenido a partir de la nube de puntos densa..... 62

Figura 31. Modelo digital del terreno obtenido a partir de la nube de puntos densa clasificada. 63

Figura 32. Parámetros utilizados para crear el Ortomosaico de la zona de estudio. 63

Figura 33. Ortomosaico de la zona de estudio generado a partir del modelo digital de elevaciones.
..... 64

Figura 34. Polígono delimitador usado para recortar los productos al momento de ser exportados.
..... 64

Figura 35. Creación de polígonos para las clases establecidas..... 67

Figura 36. Procesamiento: a. Ejemplo de creación de firmas ingresando diferentes rasters y el shp de clasificación creado (Clases); b. Clasificación supervisada en base la firma previamente creada.
..... 68

Figura 37. a. Clasificación supervisada cruda, b. Clasificación supervisada corregida. 69

Figura 38. Representación de las variables usadas en el análisis Multicriterio.	71
Figura 39. Cartilla instructiva para la identificación de geoformas aptas para la formación de depósitos.	72
Figura 40. Proceso de barequeo. a. Uso de la canaleta y el tapete atrapamugre; b: Limpieza del tapete sobre la batea; c: Recopilación de arenas negras dentro de un balde; d: Producto final (Oro).	74
Figura 41. Tramo del río California en donde se observa el Cauce Fluvial (Fca), barras laterales (Fbla), barras longitudinales (Fbl) y barras transversales (Fbt).....	75
Figura 42. Barras laterales (Fbla) y longitudinales (Fbl), esta última con influencia de un obstáculo(1) o Fbt.	76
Figura 43. Tramo del río California con barras laterales (Fbla), obstáculos o Fbt y zona de rápidos.	77
Figura 44. Tramo del río California. 1: Zonas trabajadas por los mineros; Fbla: Barras laterales; Fca: Cauce aluvial.	78
Figura 45. Tramo del río California con zonas de intervención antrópica (1).....	78
Figura 46. Modelo digital de superficies (izquierda), acercamiento a escala 1:120 del DSM (derecha).	79
Figura 47. Modelo digital del terreno (izquierda), acercamiento a escala 1:120 del DTM (derecha).	80
Figura 48. Ortomosaico (izquierda), acercamiento a escala 1:120 del Ortomosaico (derecha)..	80
Figura 49. Mapa de análisis multicriterio del tramo del Río California de acuerdo a los porcentajes de la Tabla 8.	81
Figura 50. Dendograma de las firmas generadas.	86

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Descripción del trabajo de campo.

Apéndice B. Mapa de favorabilidad de formación de depósitos aluviales.

Apéndice C. Cartilla didáctica.

Resumen

Título: Metodología para la identificación de zonas con potencial concentración de oro (Au) sobre cauces fluviales, aplicando técnicas fotogramétricas, levantamiento geomorfológico y cartografía geológica. *

Autor: Diego Fernando Salazar Manrique y Wladimir Pineda Alhucema. **

Palabras claves: análisis multicriterio, barequeo, fotogrametría digital, minería artesanal, oro aluvial, VANT.

Descripción: Por muchos años la labor del minero artesanal en la extracción de oro aluvial se ha basado en su juicio empírico, lo cual limita su producción y no permite que logre los resultados suficientes para su sustento.

Por lo anterior, el presente proyecto se centró en el desarrollo de una metodología clara y estructurada para la identificación de las zonas más favorables en cuanto a la concentración de este elemento, aplicable a cualquier depósito aluvial con potencial enriquecimiento de metales preciosos. Para ello, se planteó una estrategia de trabajo basada en la interpretación geomorfológica del cauce del río California en cercanías al municipio de Suratá, a partir del análisis de productos digitales obtenidos a través de fotogrametría digital con drone y un levantamiento en campo, donde se identificaron los factores que influyen en la formación de depósitos. Estos fueron considerados para hacer un análisis multicriterio y determinar las zonas de mayor potencial. Los productos finales corresponden a un mapa de favorabilidad de concentración y una cartilla instructiva para potencializar la labor del barequero.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se deduce que tanto la aplicación de la teoría como el análisis multicriterio por medio de softwares arrojan resultados positivos que ahorran tiempo y dinero y que hacen más eficiente la labor de los mineros artesanales.

* Trabajo de grado

** Facultad De Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología. Director Andrés Mauricio Cáceres Bottia, Geólogo M. Sc. Codirector José Pedro Mora Ortiz, Geólogo M. Sc.

Abstract

Title: Methodology for the identification of areas with potential concentration of gold (Au) on riverbeds, applying photogrammetric techniques, geomorphological survey and geological mapping. *

Author: Diego Fernando Salazar Manrique y Wladimir Pineda Alhucema. **

Keywords: multicriteria analysis, gold panning, digital photogrammetry, artisanal mining, alluvial gold, UAV.

Description: For many years, the work of the artisanal miner in the extraction of alluvial gold has been based on his empirical judgment, which limits his production and does not allow him to achieve sufficient results for his livelihood.

Therefore, this project focused on the development of a clear and structured methodology for the identification of the most favorable areas in terms of the concentration of this element, applicable to any alluvial deposit with potential enrichment of precious metals. To do this, a work strategy was proposed based on the geomorphological interpretation of the California riverbed in the vicinity of the municipality of Suratá, based on the analysis of digital products obtained through digital photogrammetry with a drone and a field survey, where factors influencing deposit formation. These were considered to make a multicriteria analysis and determine the areas of greatest potential. The final products correspond to a concentration favorability map and an instructive primer to enhance the work of the artisanal miner.

According to the results obtained, it follows that both the application of the theory and the multicriteria analysis through software yield positive results that save time and money and make the work of artisanal miners more efficient.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering, School of Geology. Director Andrés Mauricio Cáceres Bottia, Geologist M.Sc. Codirector José Pedro Mora Ortiz, Geologist M.Sc.

Introducción

En un país como Colombia, la economía se fundamenta en diversos sectores, el sector primario o sector agrícola, el sector secundario o sector industrial y el sector terciario o sector de prestación de servicios. La minería se clasifica como subsector industrial extractivo, dentro del sector secundario o industrial, (Cajal, 2019). En el ámbito minero, una de las actividades más representativas en Colombia es la minería artesanal de oro aluvial, práctica que al día de hoy se realiza de manera empírica usando herramientas primarias como la batea. Esta actividad es realizada principalmente por población que se encuentra en alto riesgo socio-económico y, a quienes ejercen esta labor se les conoce como barequeros.

El barequeo en Colombia se remonta al siglo XVI, previo a la colonización española, según libros históricos y literarios como “El liberto Angola compra una esclava y otras tratas en el país de oro” escrito por Ramiro Montoya, el cual relata que para la época de los aborígenes ya se desarrollaba esta actividad, la cual habría sido realizada principalmente por esclavos bajo el yugo de los invasores, (López, 2020).

De acuerdo al Glosario Técnico Minero del Ministerio de Minas y Energía (2003), el barequeo consiste en el “lavado de arenas (depósitos tipo placer) por medios manuales sin ninguna ayuda de maquinaria o medios mecánicos y cuyo objeto es separar y recoger metales preciosos contenidos en dichas arenas”. Para realizar esta práctica se usa la batea, la cual puede ser de madera o metálica con forma cónica, donde por efecto de la gravimetría se concentran los minerales pesados o “arenas negras”, y se acumulan en un recipiente para su posterior procesamiento. Aunque el proceso corresponde a una técnica relativamente sencilla e individual, se puede observar que el aprovechamiento no es el óptimo, ya que se dan pérdidas de minerales pesados durante el proceso de lavado (Toscano, et al., 2012).

La concentración de minerales pesados sobre el cauce de un río se denomina depósitos de tipo placer y corresponde a depósitos que contienen minerales de interés económico en arena, grava y otros materiales detríticos o residuales (Wells, 1989). Estos son formados por procesos mecánicos derivados de la erosión, desintegración de rocas y el aporte de vetas mineralizadas, los cuales posteriormente serán transportados por acción fluvial y concentrados o acumulados en zonas donde los drenajes disminuyen su energía y, por ende, su capacidad de carga (Griffith, 1960; Macdonald, 2007).

Estas zonas de acumulación pueden identificarse más fácilmente gracias al avance tecnológico en el desarrollo de herramientas que permiten el mapeo de precisión con fotogrametría, la cual tiene como propósito reconstruir un espacio tridimensional (terreno u otro objeto) a partir de imágenes bidimensionales de este y parámetros que los vinculan (Cheli, 2011 p. 91). Las herramientas a usar serán vehículos aéreos no tripulados (VANTs) o por sus siglas en inglés (UAVs), comúnmente denominados como drones, que incluyen cámaras y sensores que permiten obtener imágenes aéreas de alta resolución, ortomosaicos, mapas de datos referenciados y modelos digitales 3D. Los VANTs son usados en un amplio rango de propósitos como ecología, agricultura, sistemas fluviales, entre otros (Harrald, et al., 2021).

El presente proyecto pretende aprovechar la gran utilidad de los VANTs en el ámbito geológico, incorporando estas herramientas tecnológicas a las prácticas convencionales de trabajo de campo, generación de cartografía y uso de los SIG para desarrollar una metodología aplicable a cualquier cauce donde se pueda ejercer la minería artesanal, con la cual puedan elaborarse mapas de precisión donde se describan y se ubiquen las geoformas fluviales que permiten la formación de placeres con mayores concentraciones de oro. Estos mapas son pensados como instrumentos de fácil lectura para mejorar la labor y, por consiguiente, la producción extractiva de los barequeros.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para la identificación de zonas favorables de concentración de oro sobre cauces fluviales mediante la integración de la cartografía geológica de la zona, la caracterización geomorfológica del cauce y el análisis de fotogrametría digital a detalle con dron.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar la dinámica existente entre los rasgos geomorfológicos del cauce fluvial y su potencial para atrapar partículas de oro.

Definir una estrategia de trabajo para la aplicación de fotogrametría digital sobre cauces fluviales y el uso de herramientas GIS para la clasificación de los productos dron y definición de las zonas de mayor interés.

Establecer las variables que influyen en la formación de depósitos y generar un mapa de favorabilidad de acumulación de mineral a escala 1:100 de un tramo del Río California en cercanías al casco urbano del municipio de Suratá.

Elaborar una cartilla de fácil uso y entendimiento dirigida a mineros artesanales, que exprese gráficamente las zonas más favorables para la concentración de oro aluvial, con el fin de potencializar la producción extractiva del metal precioso.

2 Planteamiento del Problema y/o Justificación

La explotación artesanal de oro aluvial es una práctica ancestral y una actividad económica que por décadas ha jugado un papel fundamental en muchas familias colombianas. Sin embargo, a pesar de la antigüedad de la ocupación, su ejecución sigue siendo muy rudimentaria y los barequeros no cuentan con instrumentos que les permitan efectuar una producción con la cual puedan tener crecimiento y desarrollo económico, por lo cual esta actividad se cataloga como minería de subsistencia.

Desde el punto de vista legal, el Código de Minas, amparado por la Ley 685 del 2001, entiende al “barequeo” como *una actividad que se resume al lavado de arenas por medios manuales sin ninguna ayuda de maquinaria o medios mecánicos y con el objeto de separar y recoger metales preciosos contenidos en dichas arenas*. Actualmente, el barequeo es permitido siempre y cuando el trabajador se inscriba ante el alcalde del municipio y cuente con la autorización de los propietarios de los terrenos donde se efectúe esta labor. Se estipula que no está permitido realizar barequeo en áreas como parques nacionales naturales, zonas de reserva forestales, entre otras zonas restringidas parcialmente.

La formalización de los mineros artesanales se ha priorizado en el país mediante la implementación de plataformas para el registro de mineros de subsistencia, como el módulo “GÉNESIS”, a cargo de la Agencia Nacional de Minería, que entró en operación el 1 de Julio del 2020, para reemplazar al anteriormente conocido “SI.MINERO”, que administraba el Ministerio de Minas y Energía (Agencia Nacional de Minería, 2020).

Esta formalización permite llevar un control estadístico tanto del total de población que se dedica a la actividad como de la producción que generan. El Ministerio de Minas y Energía (2021) indica en su reporte de Explotación de Oro de Aluvial (EVOA) que este tipo de minería tiene un

tope máximo de producción de metales preciosos (oro, plata, platino) de 35 gramos promedio mensual o 420 gramos como tope máximo anual. Adicionalmente señala que, en el año 2020, el 40% del oro producido a nivel nacional (18,9 t) provino de los barequeros.

Los datos anteriores evidencian la importancia de este tipo de minería para el país, sin embargo, en regiones como el Chocó, la riqueza mineral abundante contrasta con las lamentables condiciones sociales en que se encuentran sus habitantes, quienes viven en estado de pobreza monetaria extrema, tienen tasas de analfabetismo elevadas y una tasa de cobertura en salud insuficiente, (Lara, et al., 2020).

Por otro lado, en términos de justicia de género en encuesta realizada por Arcos & Rivera en el 2018, se determinó que el 58% de las mujeres barequeras en el bajo Cauca antioqueño ganaban menos de la mitad de un salario mínimo legal vigente (SMLV) y el porcentaje restante apenas superaba la mitad del mismo, además de concluir que el mayor porcentaje de las mujeres barequeras se dedicaban exclusivamente a la minería artesanal sin tener ninguna otra actividad económica de respaldo. A esto se suma que la fuerza operativa de este grupo poblacional en este tipo de minería es considerable, pues solo en el chocó, se estima que en la actividad extractiva intervienen cerca de 850 mujeres, donde al menos el 67% de ellas tiene un rol operativo, (Ministerio de Minas y Energía, 2012, en Lara, et al., 2020).

Lo anterior contrasta con los datos de producción de mineros de subsistencia suministrados por la ANM (2021), donde se evidencia que cerca del 40% de los mineros no logra ni la mitad de la producción anual permitida. Esto puede estar ligado a que las fases de exploración fluvial se basan netamente en fundamentos empíricos y carecen de herramientas tecnológicas y metodologías estructuradas. Con el uso de nuevas tecnologías como los Vehículos Aéreos no

Tripulados (VANT's) se tiene una mejor perspectiva geoespacial y aplicar una metodología organizada permitirá realizar un análisis detallado y ágil de cualquier cauce.

Basado en lo anterior, se hace indispensable desarrollar un esquema aplicable a cualquier zona de explotación de oro aluvial donde, a partir de la integración de la geología y la fotogrametría de precisión con el uso de VANT's, se obtengan mapas a escala detallada de morfo-estructuras óptimas para la acumulación de minerales pesados, generando herramientas directas para que el minero artesanal y, en especial, las madres cabeza de familia optimicen su labor, brindando especial atención a la compleja tarea de transmitir los conocimientos técnicos a los mineros como información simplificada y fácil de entender.

3 Localización de la Zona De Estudio

El área seleccionada para desarrollar el presente trabajo se ubica en el municipio de Suratá, localizado a 46 Km de la ciudad de Bucaramanga, capital del departamento de Santander. Específicamente, el desarrollo del trabajo tendrá lugar sobre un tramo del Río California (tributario del Río Suratá), comprendido entre las coordenadas:

Tabla 1.

Coordenadas zona de estudio.

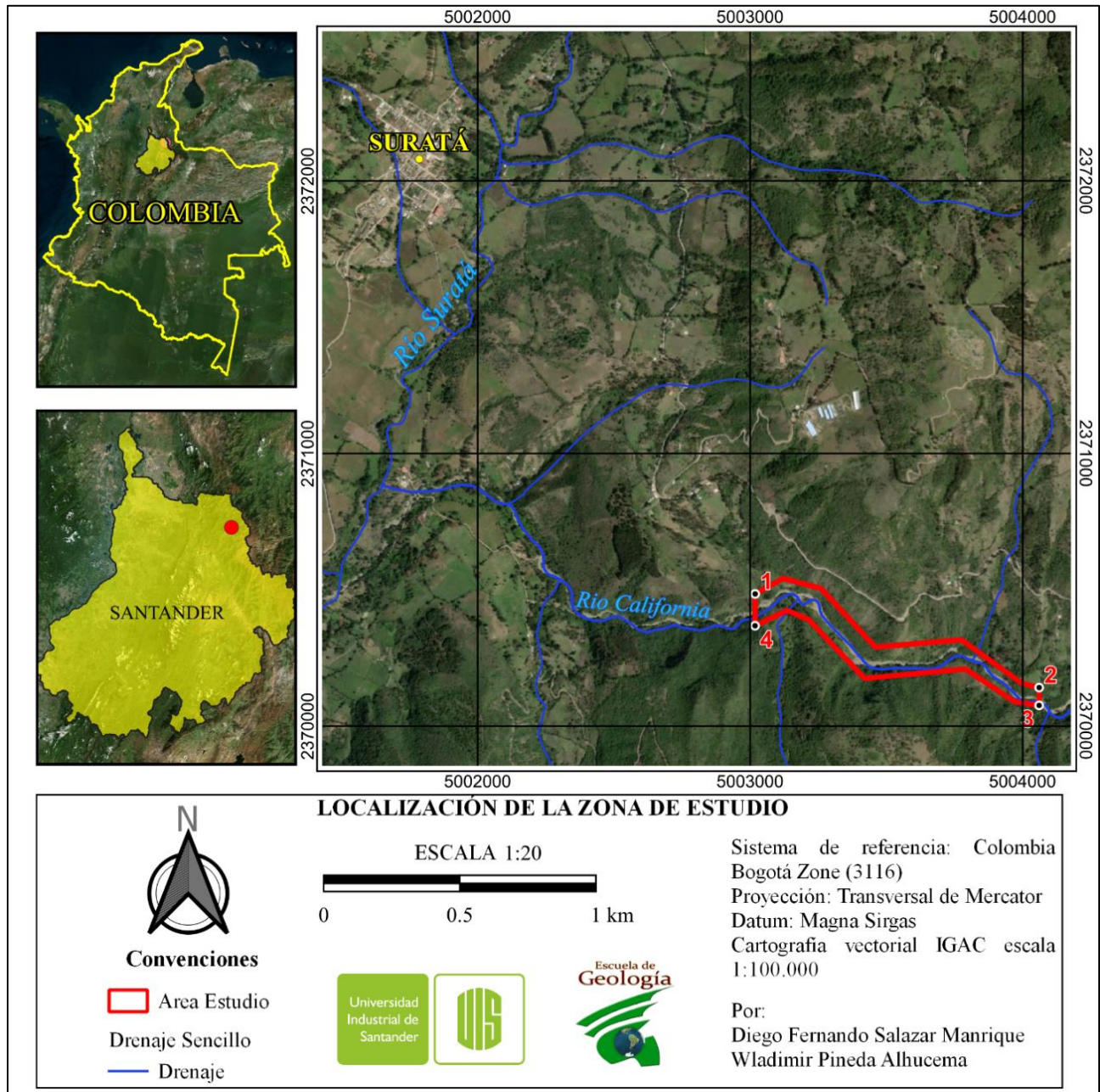
	Este (X)	Norte (Y)
1	1121996	1305004
2	1123040	1304662
3	1123040	1304597
4	1121996	1304886

según el sistema coordenado de referencia Magna Sirgas Colombia Bogotá Zone (3116) (Figura 1). La zona en cuestión se localiza en cercanías al casco urbano del municipio de Suratá, aproximadamente a 1.3 Km al sureste del municipio.

El área total aproximada para el levantamiento geológico – fotogramétrico es de 0.45 Km², que comprende una longitud aproximada del cauce de 1800 m, con un ancho que oscila entre los 100 y 170 m, tratando de mantener una equidistancia a lado y lado del cauce.

Figura 1.

Mapa de localización del área de estudio, tramo del Río California demarcado en el recuadro rojo.



4 Marco Teórico

El presente capítulo contiene una descripción de los aspectos teóricos relevantes para el entendimiento de la formación de placeres fluviales, así como las variables que tienen una incidencia directa en dicho proceso. Además, se reseña sobre el funcionamiento y utilidad de la fotogrametría en el presente estudio.

4.1 El Oro

La palabra “oro” se deriva del latín *aurum* que a su vez proviene del hebreo *aor* que significa “luz”. Desde tiempos remotos el oro ha hecho parte fundamental del desarrollo de la humanidad, siendo partícipe en el progreso de múltiples civilizaciones. Las características que llaman especialmente su atención son el brillo y la inalterabilidad. Se ha posicionado como el metal máspreciado por el hombre, llegando a ser símbolo de riqueza y prosperidad, (Lozano & Pulido, 1986).

El oro es un metal de transición entre Ag y Rg en la serie química de la tabla periódica. Su número atómico es 79, tiene una masa atómica de 196.96655 g/mol, y solo tiene un isótopo estable, el número 197 (Macdonald, 2007). Algunas de sus propiedades físicas son su color amarillo brillante, su dureza de 2.5 a 3 según la escala de dureza de Mohs categorizándolo como un mineral blando, su maleabilidad y ductilidad superior a la de otros metales, lo que facilita su manipulación en la joyería. Adicionalmente, es un buen conductor de calor, de electricidad y, en definitiva, siendo quizá la característica más importante para nuestro propósito, es un metal pesado, con una densidad de 19.32 g/cc, (Lozano & Pulido, 1986).

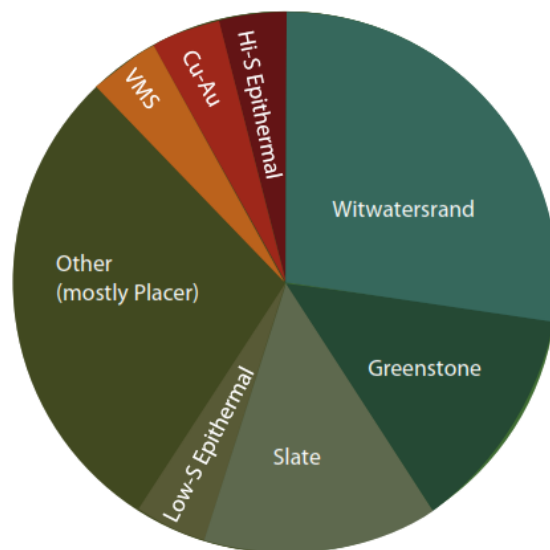
El oro ocurre principalmente en estado nativo, con frecuencia asociado con plata (Ag), cobre (Cu), bismuto (Bi), mercurio (Hg) y elementos del grupo del platino y en telururos y seleniuros, (Macdonald, 2007). Cuando se encuentra en aleación con otros elementos las

propiedades del Au varían, por ejemplo, cuando se une con Ag el punto de fusión desciende unos 20° C, empezando a fundir a aproximadamente 1040° C y la tonalidad pasa a ser más amarillo blancuzco. De manera similar, la tonalidad de la aleación Au/Cu varía a tonos cálidos o rojizos y la fusión desciende considerablemente a unos 890° C, cuando se da una relación 80/20. Estas aleaciones permiten manipular más fácilmente el oro, lo cual es útil tanto para el uso industrial (tecnología), como artesanal (joyería) (Montero & Rovira, 1991).

Son múltiples los yacimientos en donde se aloja el oro asociado con otros elementos, por ejemplo, en yacimientos tipo pórfido de Cu-Au-Mo, en Volcanogenic Massive Sulfide (VMS), en yacimientos epitermales de alta y baja sulfuración, y en ambientes metamórficos como yacimientos de oro orogénico. Pero principalmente, el oro que circula a nivel mundial, según muestran Phillips & Powell (2015) (Figura 2), se ha obtenido de depósitos asociados a ambientes denudacionales, de depósitos tipo placer y el depósito de oro conglomerático Witwatersrand, que ha producido más 30% del Au mundial, esto es más de 50000 toneladas de mineral.

Figura 2.

Producción total de oro a nivel mundial. Tomado de: Phillips & Powell, 2015.



4.2 Extracción Artesanal de Oro Aluvial

El término “Minería Artesanal” hace referencia al arte u oficio mecánico para la explotación de yacimientos minerales mediante el uso de técnicas tradicionales, (Real Academia Española, 2021; Anders, et al., 2022). Sin embargo, Rubiano, et al., (2020) consideran que para establecer una definición más concisa es necesario tener en cuenta la magnitud de la operación, la tecnología que utiliza y adicionalmente reconocer el legado tradicional que la actividad representa. Por lo que a la fecha y desde la década de los 70’s no se ha logrado establecer una definición concreta al respecto.

Por lo anterior, es más común usar términos como “Minería Aluvial” para referirse a aquellas actividades de minería desarrolladas sobre las riberas o cauces de los ríos, y “Minería de Subsistencia” para señalar la pequeña minería de aluvión (barequeo) realizada por personas naturales y asociadas principalmente a familias que por métodos rudimentarios extraen minerales cuyas ganancias son apenas justas para subsistir (Ministerio de Minas y Energía, 2003). Estos mismos autores definen el término “Barequeo” como la actividad por medio de la cual, usando un recipiente cóncavo denominado “Batea” se lavan arenas para obtención de metales preciosos, de manera manual y sin ayuda de ningún tipo de maquinaria o medios mecánicos.

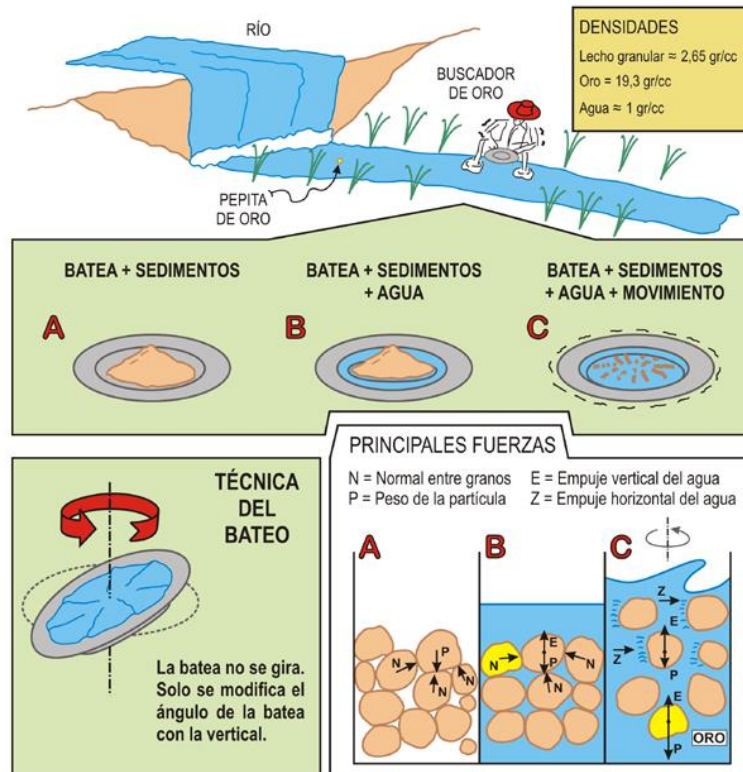
El uso de la batea tiene un fundamento físico como se representa en la Figura 3. Cuando se tiene la batea llena solo de sedimentos, las fuerzas que actúan sobre las partículas en reposo son las del *peso* de la partícula (P) que es una fuerza vertical hacia abajo y las *fuerzas normales* (N) que son perpendiculares a las superficies en contacto entre los demás granos adyacentes (principio de acción y reacción – tercera Ley de Newton). Cuando se agrega agua empieza a actuar otra fuerza vertical y hacia arriba sobre las partículas, denominada *empuje* (E). En este punto, se procede a

realizar movimientos oblicuos para imprimir un movimiento circulatorio a la solución antes en suspensión (sin girar la batea), (Toscano, et al., 2012).

Al eliminarse el estado de suspensión las fuerzas normales disminuyen, por lo que existe un menor contacto entre partículas, de manera que la estabilidad de cada grano va a depender de sus propiedades físicas y el efecto del empuje que ejerza el agua sobre sí. Es decir, las partículas que sean menos pesadas que la fuerza ejercida por el agua en circulación van a ascender y a ser desplazadas hacia los bordes de la batea y, en su defecto, expulsados de la misma. Por el contrario, los minerales pesados resistirán al movimiento y tenderán a concentrarse en el fondo de la batea (Toscano, et al. 2012).

Figura 3.

Esquema que muestra la técnica del bateo. Tomado y modificado de: Toscano, et al. 2012.



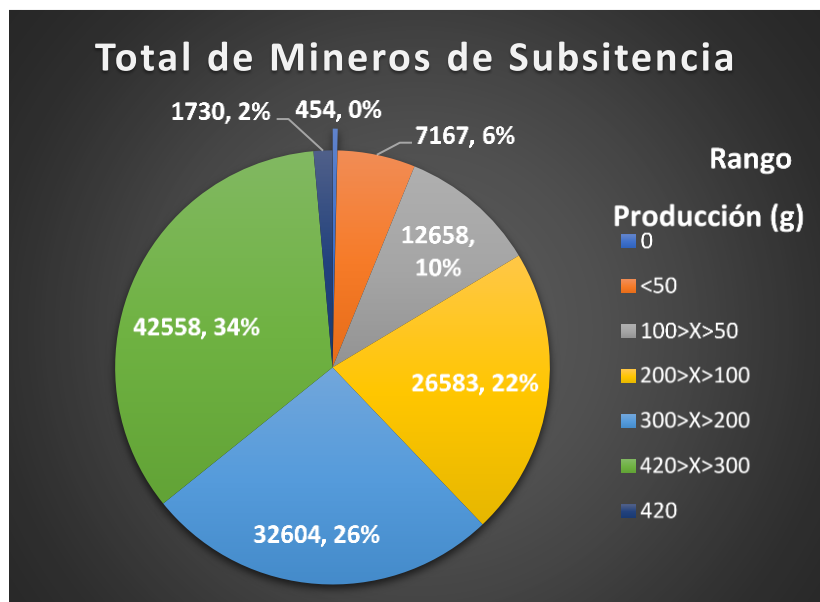
De manera desfavorable, el concepto de “Minería Artesanal” se encuentra ligado estrechamente al de “Minería Ilegal”, como menciona el Ministerio de Minas y Energía (2003), quien define este último como aquella minería desarrollada sin estar inscrita en el Registro Minero Nacional, es decir, sin título minero. Para dar solución a esta problemática el Ministerio de Minas y Energía optó por implementar en el año 2016 el sistema de información del sector minero (SI.MINERO) para el registro y formalización de los mineros de subsistencia, con el propósito de tener registro y control de las personas dedicadas a esta actividad en cada municipio (Ministerio de Minas y Energía, 2017).

El “SI.MINERO” tuvo vigencia hasta el 30 de marzo de 2020, dado que en el artículo 327 de la Ley 1955 de 2019 se establece que la Agencia Nacional de Minería (ANM) pone a disposición de las alcaldías el módulo “GÉNESIS” para el Registro de los Mineros de Subsistencia, reemplazando al “SI.MINERO”. El nuevo módulo entró en funcionamiento el 31 de enero de 2020 y posteriormente se estipularon los lineamientos y procedimientos para realizar la migración de los mineros inscritos a la nueva plataforma y la inscripción de las personas aún no formalizadas (Agencia Nacional de Minería, 2020).

En base al listado de producción de metales de Mineros de Subsistencia actualizada al 27 de diciembre de 2021, suministrada por la Agencia Nacional de Minería, a nivel nacional están registrados 123.754 barequeros que extraen oro, plata y platino. En la Figura 4 se expone la cantidad de barequeros para ciertos rangos de producción.

Figura 4.

Producción de mineros de subsistencia en rangos. (Basado en: Agencia Nacional de Minería, 2021).



Como se puede observar, cerca del 40% de mineros no alcanzan ni la mitad de producción anual permitida. Solamente el 2% de los barequeros (1730) llegaron al límite permitido de producción anual, el cual es de 420 gramos de metales (oro, plata y platino), según la resolución 40103 de 2017 (Agencia Nacional de Minería, 2020). Siendo el oro el commodity principal, seguido de la plata con producciones menores a 50 gramos anuales, y en menor proporción, el platino que solo lo comercializaron 2521 mineros registrados, (Agencia Nacional de Minería, 2021).

En el sector extractivo, la participación de las mujeres es considerable, (Bermúdez, et al., 2011; PNUMA & MADS, 2012; y Arcos & Rivera, 2018), y quienes en su mayoría son madres cabezas de hogar que dependen de la minería para solventar las necesidades básicas de sus familias, con el agravante de recibir salarios significativamente más bajos que el de los hombres por las

mismas labores exigentes y repetitivas que suponen la operación, (Lahiri-Dutt, 2015, en Rubiano, et al., 2020, p. 13).

4.3 Formación de Placeres

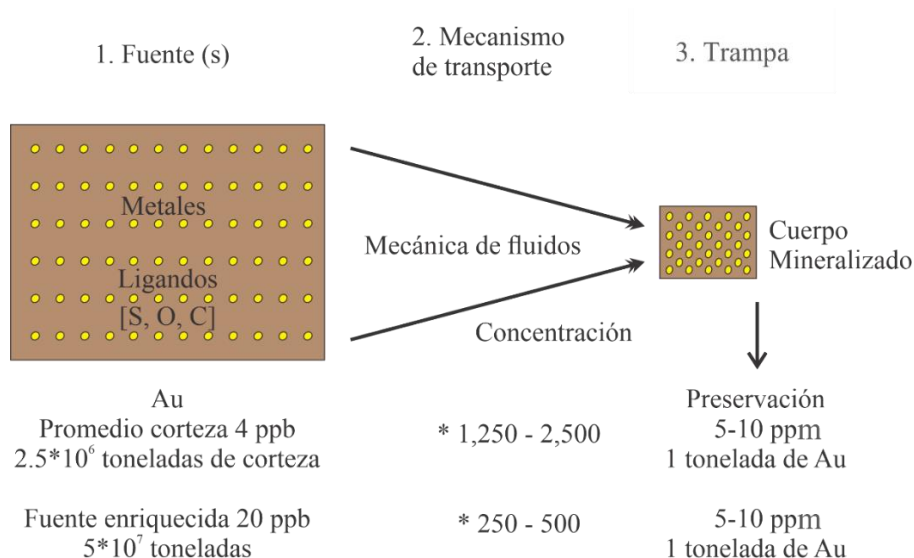
Por definición los placeres son aquellos depósitos detríticos que se forman por procesos mecánicos, derivados de la erosión y la desintegración de rocas y venas mineralizadas (fuente), que posteriormente son movilizadas por la acción de las corrientes de agua (transporte), y finalmente son concentradas en zonas donde desciende la velocidad de la corriente, es decir, donde los ríos y canales pierden su capacidad de carga (depositación), (Griffith, 1960; y Smirnov, 1982).

La formación de los placeres sigue la dinámica de formación básica de cualquier tipo de yacimiento, la cual consta de tres partes fundamentales: una fuente, un mecanismo de transporte, y las condiciones necesarias para la depositación y formación del cuerpo mineralizado, a lo cual llamaremos trampa (McQueen, 1997, en Macdonald, 2007).

En la Figura 5 se ilustra el proceso tomando el oro como ejemplo.

Figura 5.

Requerimientos básicos para la formación de cualquier depósito mineral. (Tomado y modificado de McQueen, 1997, en Macdonald, 2007).



Existen diferentes maneras de clasificar los placeres: según su ambiente de formación pueden ser placeres de playa, glaciales, eólicos, entre otros. Hay clases según la edad del depósito (cuaternarios y fósiles), el tamaño y la forma del lugar de formación (de manto, estratificados, lenticulares, y otros). Por otro lado, hay clasificaciones de acuerdo a la distancia con respecto al lugar de destrucción de la roca fuente: son eluviales si no hay transporte, diluviales y proluviales según la posición sobre la pendiente del deslizamiento, y fluviales o aluviales si el transporte es dominado por una fuente hídrica.

Además, es importante resaltar que las partículas de oro son distintas en tamaño y forma según el tipo de depósito placer en el que se encuentren, como se observa en Macdonald (2007), quien compara características del oro en placeres eluviales y en placeres aluviales, (Tabla 2).

Tabla 2.

Modelo simplificado que relaciona las características del oro aluvial con el medio ambiente (Tomado y modificado de Giusti, 1986, en Macdonald, 2007).

(Incremento de la distancia con la fuente)					
Placer Eluvial			Placer Aluvial		
Morfología grano de Oro	Irregular, cristales primarios aún preservados, muchas inclusiones, muy alto CSF	Irregular, redondeadas protuberancias, algunos cristales primarios aún preservados, a menudo en cavidades, principalmente inclusiones de cuarzo, alto CSF.	Escamoso, contorno redondeado de superficie irregular, re cristalizado, deformación plástica, medio - pequeño CSF.	Escamoso, redondeado, plegamiento múltiple, re cristalizado, algunos cristales secundarios octaedrales en la superficie, alto CSF.	Redondeado, con frecuencia poroso, pequeño ED, alto a muy alto CSF.
		Abrasión	Moderado	Fuerte	Fuerte
Tipo de sedimento prevalente	Cantos y Guijarros	Guijarros y arena	Arena	Arena, limo	Limo, arena
Ambiente	Alta energía	Alta - media energía		Media - baja energía	Baja energía

4.4 Variables Claves Para la Formación de Placeres Aluviales

Los factores determinantes en los procesos de acumulación aurífera en el cauce de un afluente hídrico se clasificaron en 2 grupos: pendiente y geomorfología.

4.4.1 *Pendiente*

Pendiente Topográfica. Las características de las pendientes son respuestas naturales a la interacción de patrones en constante cambio de sistemas de denudación heredados de ciclos de erosión y depositación pasados, y son intrínsecamente complejos e inestables. Las variables que afectan esas características son la geología del lecho rocoso, el clima, el suelo, la vegetación y el ángulo de pendiente (Macdonald, 2007).

La pendiente juega un papel importante en la cantidad de material y las condiciones en las que este se deposita en un afluente hídrico o en cualquier otro destino, como lo menciona Sánchez (2002) en INGEMMET (2021), la pendiente es uno de los principales factores dinámicos de los movimientos en masa formadores de las geoformas de carácter deposicional o agradacional, ya que determina la cantidad de energía cinética y potencial de una masa inestable.

Pendiente Dentro del Cauce. La pendiente dentro del cauce también tiene gran influencia en la depositación de material sedimentario. Para Smirnov (1982) la velocidad de fluencia de los ríos varía en el espacio y el tiempo, distribuyendo las masas aluviales en distintos sectores del río. Este factor puede verse influenciado por la pendiente, pues al inclinarse el cauce aumenta la velocidad, y disminuye al hacerse menos escarpado el mismo, generando las condiciones propicias para la depositación de partículas pesadas.

4.4.2 *Geomorfología*

Se considera como placer fluvial o aluvial al conjunto de partículas no consolidadas que contienen grava, arena, limo, y/o arcilla, depositado o que está depositándose principalmente a lo largo de los cursos fluviales. Pueden dividirse como depósitos de terrazas y depósitos fluviales recientes (Toscano, et al., 2012).

Según Toscano, et al., (2012), los depósitos fluviales recientes son sedimentos depositados periódicamente en los lechos de los ríos y están relacionados con las avenidas en época de lluvias. Las zonas más comunes para el bateo son los lechos de los ríos, y los puntos más adecuados están relacionados con cambios bruscos en la energía de la corriente. Con lo cual se deduce que los sitios más factibles para acumular partículas pesadas son aquellos que poseen una geomorfología que indique cambios abruptos en la energía del flujo hídrico.

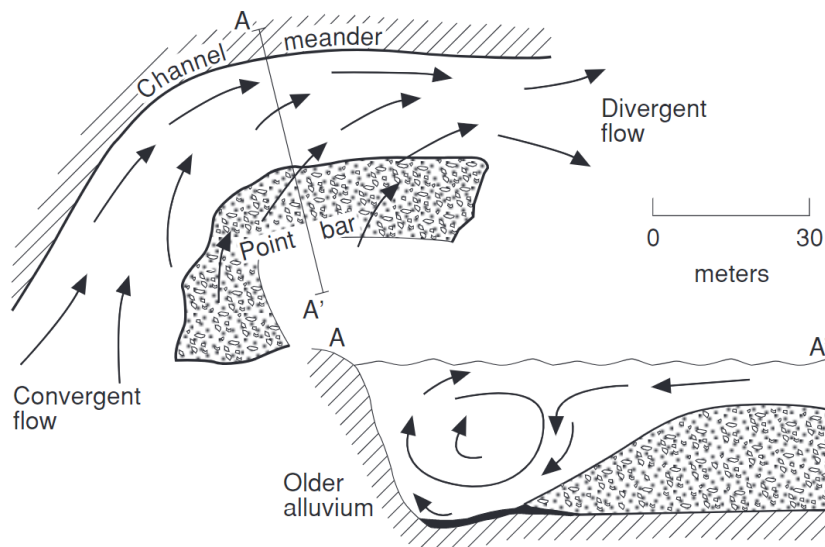
Meandros. Según Robb (2005) la concentración de minerales pesados, como oro y casiterita, dentro de un cauce puede darse gracias al desarrollo de point bars a lo largo de la orilla convexa de un canal fluvial errante. La formación de las point bar se explica de la siguiente manera:

La Figura 6 muestra la geometría y los patrones de flujo asociados con la degradación de una barra puntual en un canal de meandro y su migración hacia el banco cóncavo opuesto, que está sujeto a erosión. Las concentraciones de minerales pesados se forman en realidad en socavación degradada a lo largo del fondo del canal mismo. Ambos componentes de la clasificación del transporte parecen contribuir al proceso de enriquecimiento, a saber, el asentamiento de los granos en el ambiente altamente turbulento formado por la convergencia de orientaciones de flujo dispares y el drenaje, ya que los esfuerzos cortantes están por encima de los umbrales para la mayor parte de la carga del lecho. La clasificación por transporte, por lo tanto, da como resultado acumulaciones de placer que luego son

susceptibles de preservación a medida que el sedimento de la barra de punta migra sobre los minerales pesados acumulados, (Robb, 2005).

Figura 6.

Barra de punta de agrandamiento que se forma a lo largo del banco convexo de un canal de meandro. Tomado de Smith & Beaukes (1983) en Robb (2005).



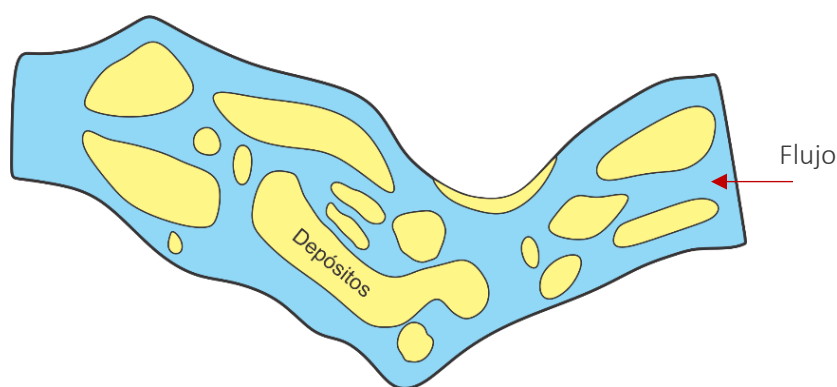
Ríos Trenzados. Macdonald (2007) afirma que la arena y la grava asociadas a ríos trenzados y meandros comprenden los materiales más gruesos de la carga de fondo y acumulan la mayor cantidad de oro. En el caso específico de los ríos trenzados este autor explica su dinámica de acumulación de partículas de la siguiente manera:

Los sedimentos de ríos trenzados son las primeras partículas en asentarse particularmente en las llanuras aluviales donde arenas finas y lodos cubren periódicamente las áreas inundadas y llenan los canales abandonados y los terrenos bajos. En cada caso, la mezcla resultante de grava, arena y finos es característica del equilibrio local entre las fuerzas viscosas y gravitatorias, las diferencias locales en la turbulencia y profundidad de la corriente y las propiedades de sedimentación de los sólidos. Las variaciones texturales son el resultado del cambio de velocidades y la competencia de la corriente sobre las superficies

de las barras. Las altas velocidades y una carga de sedimentos gruesos en la parte más profunda del canal dan lugar a horizontes de capas de grava y capas cruzadas que pueden, a medida que continúa la sinuosidad, crear una zona de retraso aurífera subyacente, (Macdonald, 2007).

Figura 7.

Río trezado con sus depósitos sedimentarios no consolidados (Vista de planta). Tomado y modificado de Purposegames.com (2022).



Obstáculos. Barras de Roca. Las barras de roca generan un asentamiento preferencial de partículas pesadas en el lecho de un río, Macdonald (2007) explica su dinámica de la siguiente manera:

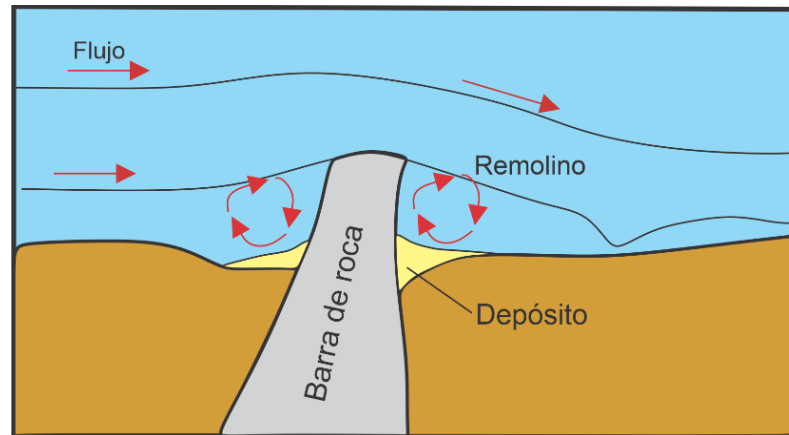
El flujo de corriente no se altera aguas arriba de la barra, pero el aumento de la presión durante una etapa activa del río conduce a la recirculación del flujo y se desarrolla un vórtice de movimiento lento como un circuito cerrado en la zona de separación. A sotavento de la barra, el cambio abrupto en la velocidad del flujo proporciona mejores condiciones para el flujo hacia atrás en un rango más amplio de caudales. Se forma un remolino cuando el flujo pasa sobre un borde afilado y la caída repentina de la velocidad hace que el flujo vuelva a circular en un rodillo o circuito cerrado. La depositación de oro y otros minerales

pesados ocurre predominantemente en las zonas más activas de separación de flujo y pueden ocurrir zonas productivas en ambos lados de la barra. (Macdonald, 2007).

Figura 8.

Separación de flujo y atrapamiento de partículas por barras en el lecho de un río (Vista de perfil).

Tomado y modificado de Mcdonald (2007).

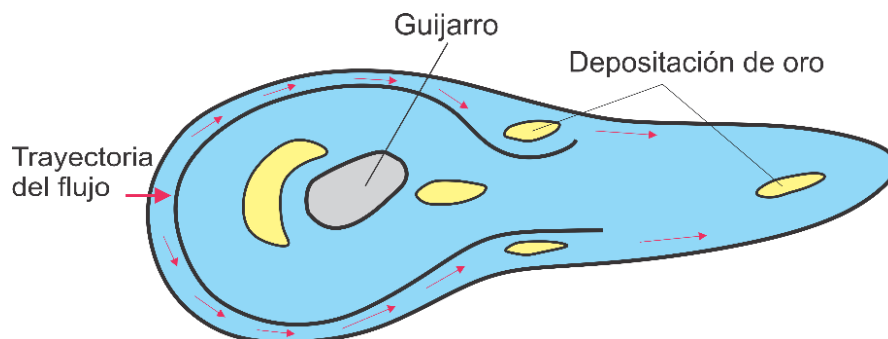


Guijarros Pequeños. Los guijarros de pequeñas dimensiones, a pesar de su tamaño, también tienen incidencia al momento de la acumulación de partículas de oro. Según Macdonald (2007), alrededor de un guijarro la perturbación es escasa y los sitios de depósito están en sombras de flujo que rodean la obstrucción.

Figura 9.

Influencia del guijarro en la trayectoria del flujo (Vista de planta). Tomado y modificado de

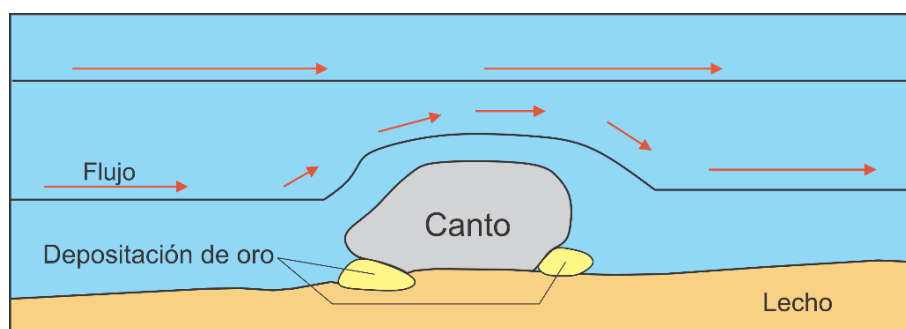
Macdonald (2007).



Cantos Rodados y Objetos Grandes. Los cantos rodados también cumplen con la función de obstáculos. Según Macdonald (2007), el flujo de las aguas alrededor de los cantos y otros objetos grandes genera remolinos y fluctuaciones de velocidad que afectan el asentamiento y el atrapamiento. Las partículas de oro más grandes quedan atrapadas debajo de los bordes de los cantos rodados y las partículas más finas son barridas para depositarse en condiciones de corriente menos turbulentas río abajo.

Figura 10.

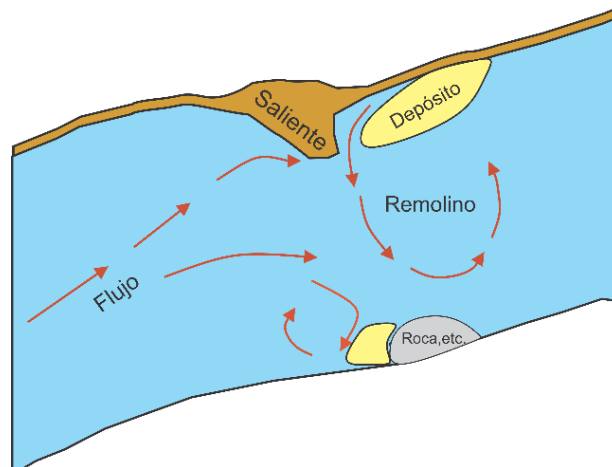
Influencia de cantos rodados en la trayectoria del flujo (Vista de perfil). Tomado y modificado de Mcdonald (2007).



Salientes. Según Smirnov (1982), la velocidad de afluencia varía al cambiar la sección de la corriente, aumentando en los intervalos de estrechamiento y de descenso de las aguas del río. Esto sucede junto a toda clase de obstáculos naturales o artificiales que inhiben la fluencia, o que producen torbellinos de agua, saltos de la temperatura y la captación del material aluvial.

Figura 11.

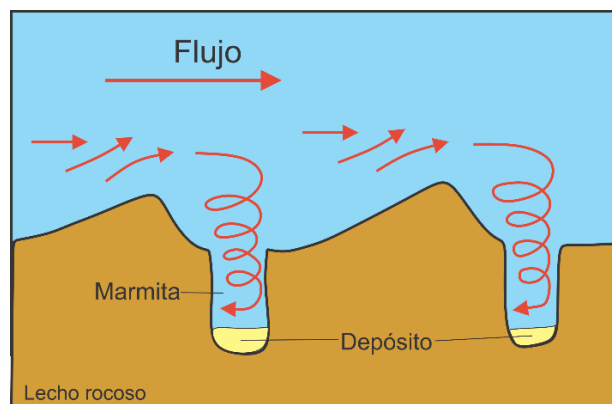
Remolino frente a un saliente de orilla, que causa la "captación" de sedimentos fluviales (Vista de planta). Tomado y modificado de Smirnov (1982).



Marmitas. En las marmitas, pocetas o canales también se dan condiciones apropiadas para atrapar sedimentos. Según Toscano, et al., (2012) las marmitas son zonas donde se concentra el flujo turbulento y pueden llegar a generarse cavidades en el lecho rocoso del cauce, en dichas cavidades hay cambios bruscos en la energía de la corriente y, por consiguiente, acumulación de partículas pesadas.

Figura 12.

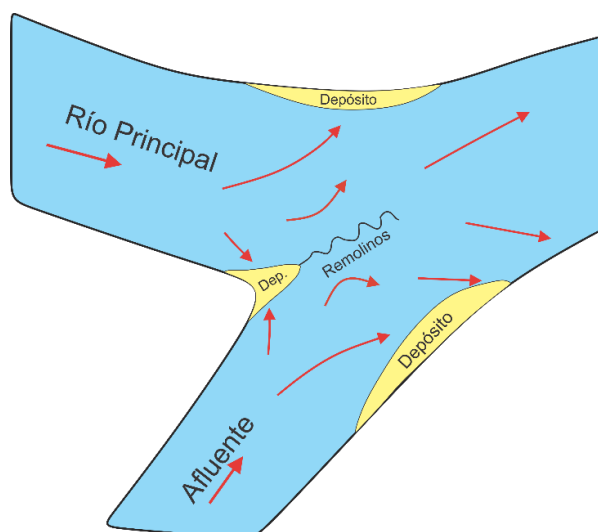
Marmitas formadas en el lecho rocoso (Vista de perfil). Tomado y modificado de Toscano, et al., (2012).



Confluencia de Dos Corrientes. En la unión de dos corrientes de agua hay diferencias en velocidad y presión, dado esto, cuando la carga de fondo de una o ambas corrientes es aurífera, se desarrollarán zonas productivas (pay streaks) a lo largo de la línea de discontinuidad. Además, debido a las fluctuaciones en el flujo y una fina clasificación ascendente de la carga de sedimentos, los remolinos se distribuirán de manera irregular, dando lugar a depósitos en las orillas cercanas al sitio de confluencia, (Macdonald, 2007).

Figura 13.

Esquema de las corrientes de fondo en la confluencia de ríos (Vista de planta). Tomado y modificado de Mackkaviéev en Mcdonald (20007).



4.5 Fotogrametría y Fotogrametría Digital

La Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) define a la “Fotogrametría” en su libro "Manual of Photogrammetry" como *el arte, ciencia y tecnología de obtener información fidedigna de los objetos físicos y del medio ambiente mediante procesos de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas y de modelos de energía radiante*

electromagnética y otros fenómenos. Esta definición incorpora la información espectral y radiométrica que la imagen digital posibilita, (Cuartero, 2003).

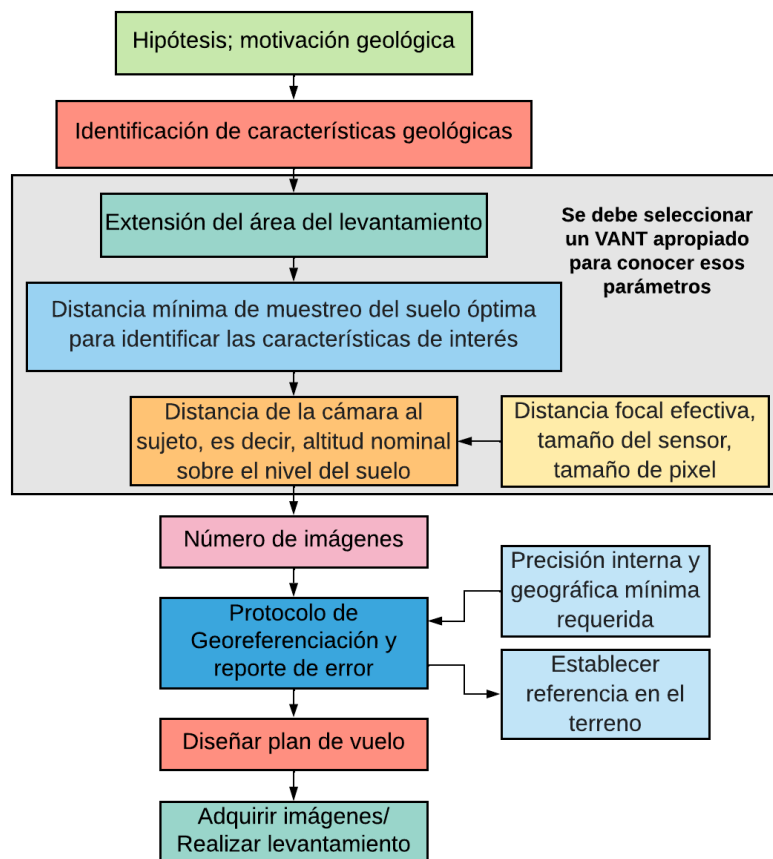
La fotogrametría digital es una técnica que combina la visión por computadora y los algoritmos de fotogrametría para extraer geometrías 3D de una serie de imágenes digitales 2D. El flujo de trabajo comienza detectando y haciendo coincidir características (matrices de píxeles) entre imágenes superpuestas que capturan una escena estática desde diferentes ubicaciones, luego se reconstruye la estructura de la escena y se estiman las posiciones, orientaciones y propiedades de la lente de la cámara para producir la denominada nube de puntos dispersa (Bemis, et al., 2014 en Dering, et al., 2019).

La nube de puntos dispersa y la información de la cámara asociada son la base para una reconstrucción mucho más detallada utilizando el método estéreo multi-vista (MVS). El resultado es una nube de puntos densa que proporciona una representación fotorrealista en 3D del color, la textura y la geometría de la escena, (Bemis et al., 2014 en Dering, et al., 2019). Permitiendo generar modelos digitales de terreno (DTM), ortomosaicos, curvas de nivel, entre otros productos métricamente confiables y de alta calidad.

Dering, et al., (2019) elaboró un flujo de trabajo aplicable para la realización de levantamientos fotogramétricos basándose en parámetros geológicos para su diseño, el cual se observa en la Figura 14.

Figura 14.

Flujo de trabajo para la planificación de estudios de fotogrametría (Tomado y modificado de Dering et al., 2019).



4.5.1 Terminología Para "Drone"

La palabra drone generalmente se refiere a una aeronave que no lleva un piloto a bordo y, en cambio, se opera desde un sistema de control terrestre o puede volar (hasta cierto punto) de forma autónoma. Existen diversos términos para referirse a esta tecnología aérea de control remoto, con pequeñas diferencias entre unos u otros. Estas terminologías son: UAV, UAS y RPAS, (Custers, 2016).

La expresión Vehículo aéreo no tripulado (VANT), en inglés Unmanned Aerial Vehicle (UAV) se centra en la plataforma de vuelo, mientras que el Sistema aéreo no tripulado (UAS:

Unmanned Aerial System) es un término más general para referirse tanto a la plataforma volante como a la estación terrestre que controla la plataforma. Otra expresión de uso frecuente es la de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS), el cual se utiliza para describir sistemas aéreos no tripulados que son controlados a distancia por un piloto, lo cual lo diferencia de los términos drone, UAV y UAS, ya que estos no necesariamente cuentan con un piloto, sino que también pueden contar con tecnologías de inteligencia artificial.

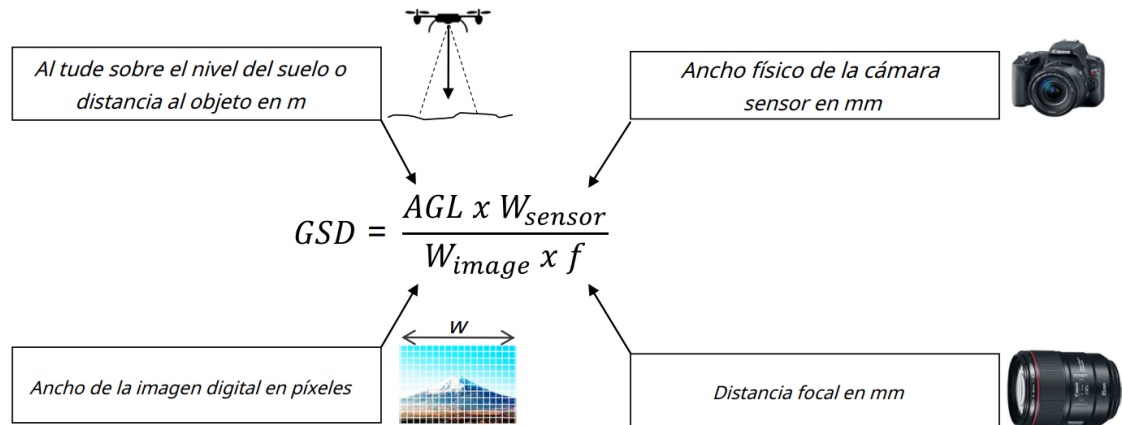
4.5.2 Fotogrametría con VANT

En sus inicios el uso de VANT estuvo motivado por fines militares. Sin embargo, con el pasar de los años su gama de usos se ha diversificado ampliamente, y en las últimas décadas se ha convertido en una herramienta fundamental para la adquisición de datos de alta calidad y a un bajo costo, con lo cual se ha logrado desarrollar un mapeo fotogramétrico más confiable, con productos de alta resolución y precisión geoespacial, (Elkhrachy, 2021). Por lo que es una herramienta óptima para el análisis geomorfológico y cartográfico detallado.

Los levantamientos de fotogrametría de VANT deben diseñarse en función de los requisitos de resolución, el área de superficie y la morfología del afloramiento, que dictan la elección del equipo VANT (de ala fija o multirroto). La resolución de las nubes de puntos 3D, ortomosaicos y DEM resultantes, depende de la llamada distancia de muestreo del suelo (GSD, también conocida como tamaño de píxel del suelo). Un GSD más pequeño dará como resultado un modelo de alta resolución. Este parámetro se rige por las características de la cámara (tamaño físico del sensor, resolución del sensor y distancia focal) y la distancia sobre el nivel del suelo o la distancia al objeto, tal como se observa en la Figura 15. Por lo tanto, es importante determinar el GSD deseado antes de elegir el equipo y planificar el levantamiento, (Dering, et al., 2019).

Figura 15.

Distancia de muestreo del suelo (GSD) en función de los parámetros de la cámara y la distancia al sujeto. Tomado de Dering, et al., 2019.



5 Marco Geológico

5.1 Geología Regional

Desde una perspectiva regional, la zona de estudio se localiza sobre el denominado Macizo de Santander (MS), una de las provincias tectónicas que conforman el departamento de Santander (Royero & Clavijo, 2001). El MS hace parte del bloque de Maracaibo (Figura 16-A) el cual está limitado al norte por la Falla de Oca, al este por la Falla de Boconó y al oeste por el Sistema de Fallas Bucaramanga – Santa Manta.

El bloque de Maracaibo habría iniciado a migrar hacia el NE entre los últimos 5 – 3 Ma por la colisión del arco de Panamá contra el NW de Sur América. El inicio de esta interacción también habría influenciado o sería coetánea con la elevación de los Andes de Mérida y la exhumación de la Cordillera Oriental del territorio colombiano, (Audemard & Audemard, 2002, en Velandia, et al., 2020).

La descripción anterior es el reflejo de la complejidad geológica y dinamismo tectónico que caracteriza a Colombia, por la interacción de los bordes de las placas tectónicas Caribe y Suramericana (Royero & Clavijo, 2001). Lo que permite entender la diversidad litológica que compone el MS en donde afloran rocas metamórficas precámbricas y paleozoicas, rocas ígneas mesozoicas y rocas sedimentarias del Paleozoico superior (García & Ríos, 1999, en Rojas, 2013).

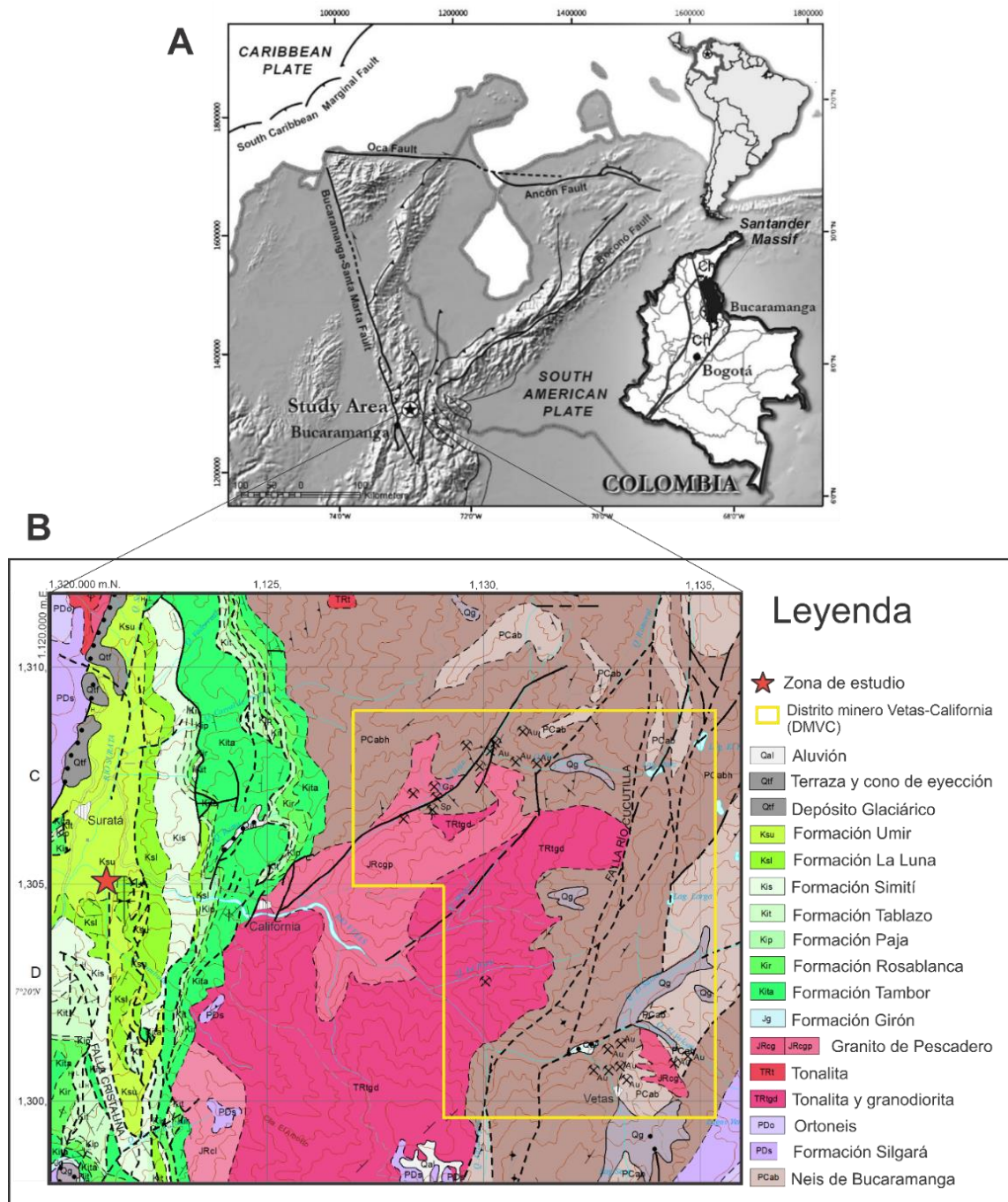
Las rocas metamórficas que conforman el basamento cristalino del MS según Royero & Clavijo (2001), son el denominado Complejo Bucaramanga (Neis de Bucaramanga en la Figura 16-B) del Proterozoico superior, el Ortogneis de Berlín con edades del Proterozoico superior y Paleozoico inferior, la formación Silgará con edades entre el Cámbrico y el Ordovícico y, con edades del Ordovícico al Silúrico las denominadas Metasedimentitas

La formación Silgará está dividida en Esquistos del Silgará, Esquistos del Chicamocha y Filitas de San Pedro. Por su parte, las Metasedimentitas se diferencian en Metasedimentitas de la Quebrada la Virgen y Metasedimentitas de Guaca. (Mantilla, et al. 2016a, en Jaimes, 2020).

Este basamento ha sido afectado por varios eventos magmáticos desde el Triásico por litologías tonalíticas y granodioríticas, cuarzomonzonitas de edad Juratriásico y riodacitas porfíricas datadas por Mantilla, et al., (2009) en edades entre 8.4 y 9.0 Ma (Mioceno). Este último evento magmático, que habría tenido una duración de por lo menos 2.5 Ma, sería el causante de la reactivación de la Falla Bucaramanga - Santa Marta y, aprovechando fallas de tendencia similar a esta (NNW) y fallas de dirección NE, ascendieron magmas desde profundidad y se emplazaron en el basamento cristalino, siendo los posibles causantes de los estilos de mineralización presentes en el Distrito Minero Vetas – California (DMVC), (Mantilla, et al., 2011).

Figura 16.

A) Ubicación del distrito minero Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental de Colombia). (Tomado de Mantilla et al., 2013). B) Localización de la zona de estudio y el DMVC en el mapa geológico regional. (Tomado y modificado de INGEOMINAS, (1977).



Según Rojas (2013), el depósito aurífero en la zona de Vetas corresponde a un epitermal de intermedia sulfuración por la presencia de calcopirita y esfalerita baja en hierro. Este yacimiento se habría dado en 4 eventos mineralizantes:

1. El primero de ellos se caracteriza por la presencia de pirita, esfalerita, galena, calcopirita y pirrotina (en trazas), con adularia, albita, anquerita, sericita, illita, e illita-esmectita como minerales de alteración indicando la neutralidad de los fluidos. Dicho evento se habría dado a temperaturas de hasta 240°C y con salinidades entre 0 y 15 % wteqNaCl.
2. En el segundo evento, la temperatura de los fluidos habría aumentado hasta unos 387°C evidenciada por la presencia de minerales de altas temperaturas como turmalina, magnetita y molibdenita, además de esfalerita sin hierro y biotita secundaria. De la misma manera, la salinidad habría aumentado hasta 18 % wteqNaCl.
3. La interacción de los fluidos con la roca caja y la mezcla con aguas meteóricas permitió que los fluidos se enfriaran, evolucionaran y se neutralizaran, precipitando sulfosales ricos en plata y zinc, además de oro, esfalerita baja en hierro, pirita, calcopirita, cuarzo masivo y cuarzo peine. En este sentido, el tercer evento se caracteriza por la neutralidad de los fluidos y una disminución de la salinidad de los mismos con respecto a los del segundo evento.
4. En el cuarto evento, un aumento súbito en la presión generó micro-brechamiento hidráulico, con una matriz de cuarzo criptocristalino y pirita. El fluido implicado en este evento ya era pobre en elementos disueltos.

Entonces, el oro presente en la zona de Vetas fue transportado en complejos bisulfurados, los cuales son estables cuando los fluidos mineralizantes son neutros y circulan a menos de 300 °C en ambientes relativamente reductores. La precipitación del oro ocurre cuando el Eh cambia y desestabiliza los complejos bisulfurados, esto último ocurre por la presencia en el sistema de aguas

meteóricas ricas en oxígeno, que a su vez se comprueba por las variaciones de salinidad de los fluidos en cada evento y por la dualidad de datos de isótopos estables que indican tanto proveniencia magmática como meteórica, (Rojas, 2013).

El oro que aprovechan los barequeros para su subsistencia en la zona de estudio, sobre el río California en cercanías a la cabecera del municipio de Suratá, deriva de la meteorización de las rocas hospedantes de la mineralización en el DMVC y de los residuos de las actividades mineras que allí se han realizado por algunos años.

5.2 Geología Local

Desde un punto de vista estructural, la zona se encuentra altamente influenciada por el Sistema de Fallas de Suratá con sus respectivas fallas transversales y fallas en dirección Norte-Sur. La Falla Suratá corresponde a una falla inversa con rumbo N 15° E con un desplazamiento de rumbo lateral derecho, (Ward, et al., 1973, en Mejía, et al., 2017). En la Figura 17 es posible observar que en la zona de estudio se encuentran fallas inferidas asociadas al Sistema de Fallas de Suratá, además de dos estructuras sinclinales definidas.

Por otro lado, en la zona de estudio afloran tres unidades sedimentarias del Cretáceo, de origen marino y con gran contenido fósil: la formación Simití, la formación La Luna y la formación Umir.

5.2.1 Formación Simití

Según Morales, et al., (1958), en Royero & Clavijo (2001) la formación Simití tiene edad del Albiano superior-Cenomaniano, y su espesor varía entre 250y 650 m. Sus condiciones de depositación fueron neríticas de aguas intermedias a profundas. La formación Simití está constituida por sales grises a negros, carbonosos, levemente calcáreos, con concreciones calcáreas hasta de 3 m y con intercalaciones de areniscas y calizas grises, localmente arcillosas y fosilíferas,

en capas delgadas. Los contactos de esta unidad son concordantes con la infrayacente Formación Tablazo y suprayacente Formación La Luna.

5.2.2 Formación La Luna

La formación La Luna tiene una gran extensión tanto en territorio colombiano como venezolano. Según Royero & Clavijo (2001), la formación La Luna tiene edad del Turoniano al Santoniano, posee un espesor que varía de 50 a 300 m, y su depositación se dio en un ambiente marino de aguas someras cercanas al borde externo de la plataforma. En el sector oriental del departamento de Santander está compuesta por calizas y lodolitas calcáreas con grandes concreciones y nódulos discoidales, biomicríticos, capas delgadas de chert y rocas fosfóricas en la parte alta de la secuencia. La Luna se sitúa con contacto concordante sobre la formación Simití e infrayace en contacto normal a la formación Colón-Mito Juan.

5.2.3 Formación Umir (Colón-Mito Juan)

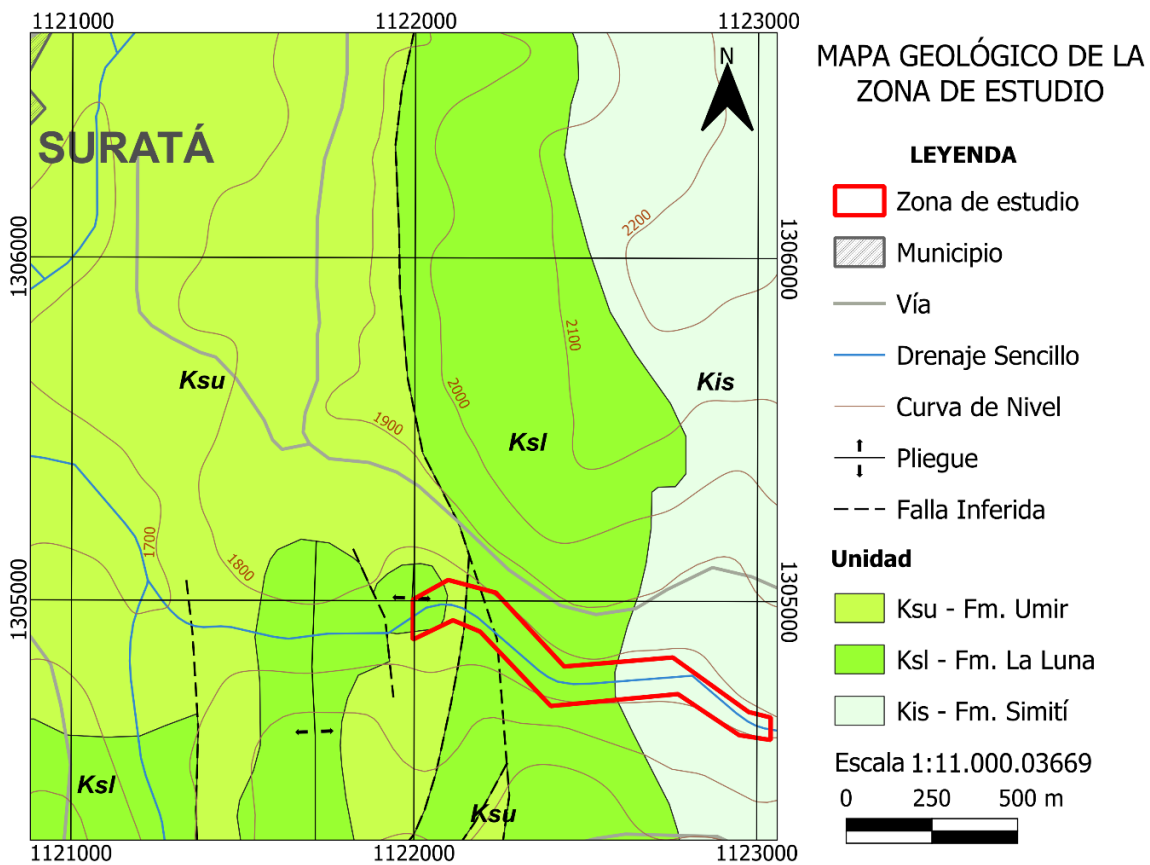
Para el área de estudio, en la plancha 110-Pamplona se utiliza la nomenclatura normal del Valle Medio del Magdalena, sin embargo, como la zona de estudio se encuentra en el bloque de Maracaibo es más preciso usar la nomenclatura de la cuenca de Maracaibo (Colombia): formaciones Colón y Mito Juan, las cuales se correlacionan con la formación Umir.

Las unidades Colón y Mito Juan son muy semejantes en litología y modo de meteorización, por lo cual es difícil cartografiar y describirlas por separado con certeza, y son consideradas como una unidad. Esta formación tiene una edad considerada del Campaniano Superior al Maastrichtiano inferior, tiene un espesor variable de 125 a 645 m, y su depositación se dio en ambientes contiguos de avances y retrocesos del nivel del mar en depósitos de agua algo profundas, bajo condiciones anóxicas. Está constituida por lodolitas grises, gris oscuras a negras, fosilíferas (foraminíferos), levemente calcáreas, piritosas, con nódulos ferruginosos y algunas capas de calizas grises,

lumaquéticas. Además, consta de capas de lodolitas gris verdosas con intercalaciones de limolitas y algunas capas delgadas de carbón hacia la parte alta. Esta formación posee un contacto inferior aparentemente concordante con la formación La Luna y un contacto superior ocasionalmente concordante con la formación Catatumbo, (Royero & Clavijo, 2001).

Figura 17.

Localización de la zona de estudio en el mapa geológico local, Plancha 110-Pamplona. (Tomado y modificado de INGEOMINAS, 1977).

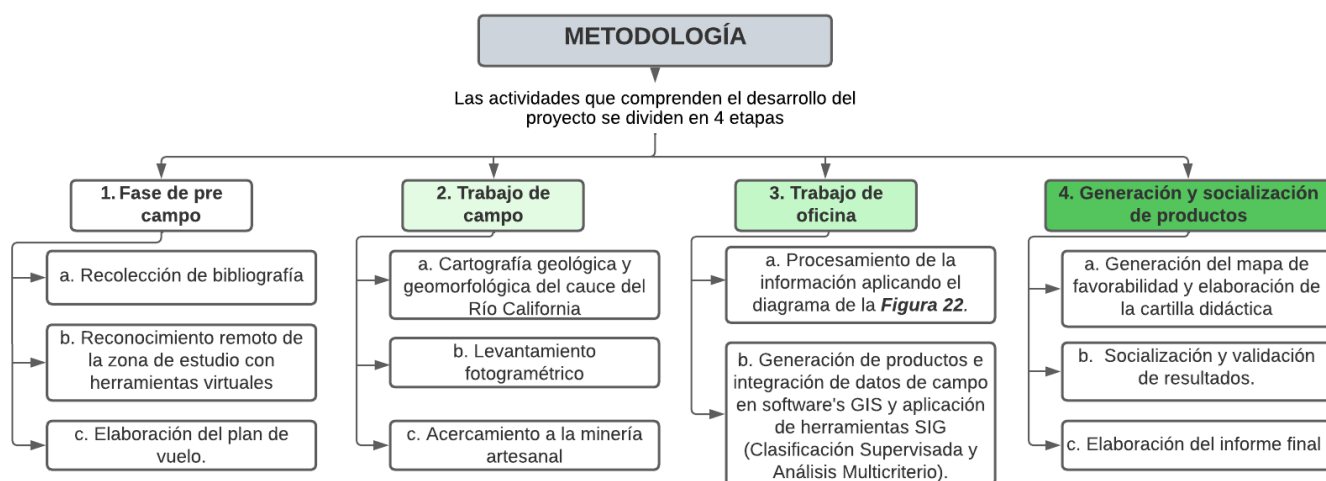


6 Metodología

Dado que en el presente documento se integran la caracterización geológica, la geomorfología de la dinámica fluvial y la fotogrametría, el desarrollo del proyecto está enmarcado en las siguientes etapas, las cuales se resumen en la Figura 18:

Figura 18.

Metodología para el desarrollo del proyecto.



6.1 Primera Etapa: Fase de Pre-Campo

Esta etapa comprende la búsqueda de información bibliográfica referente a la geomorfología fluvial y la dinámica de sedimentación de partículas pesadas en los cauces. Adicionalmente, se recopiló información de la actividad artesanal de obtención del oro, los principios físicos que explican la técnica de barequeo y demás datos de la cantidad de grupos poblacionales relacionados a esta labor en Colombia y en la zona de estudio para entender en qué medida el presente documento aportará en el mejoramiento de su actividad.

La bibliografía mencionada anteriormente corresponde a artículos científicos, trabajos de grado, libros, boletines geológicos, mapas, planchas y demás documentos con información

relevante para la presente investigación. Esta información es la base para establecer las variables que se ven implicadas en la acumulación del oro sobre el cauce fluvial.

6.1.1 Planificación del Vuelo

En la fase previa al campo es fundamental la elaboración del plan de vuelo que a su vez depende de las características del equipo a utilizar.

6.1.1.1 Especificaciones del VANT: Autel Evo II Pro

El Autel Evo II Pro es un VANT multirrotor diseñado por la marca Autel Robotics y lanzado al mercado en el año 2020. El cuadricóptero a usar pertenece al modelo 6k, diferenciándolo de otras versiones básicamente por las características de su cámara. En la Tabla 3 se observan algunas de las especificaciones técnicas más relevantes de la aeronave y de su respectiva cámara.

Tabla 3.

Características del Autel Evo II Pro 6k, especificaciones de la aeronave y de la cámara (Autel Robotics, 2020).

VANT: Autel Evo II Pro 6k				
Aeronave		Cámara		
Peso	1174g	Sensor	1" CMOS	Píxeles efectivos: 20 millones
Dimensiones	Plegado: 228*133*110 mm	Lente	FOV: 82°	Apertura: f/2.8– f/11
	Desplegado: 424*354*110 mm	Resolución de imagen fija	5472*3648 (3:2)	5472*3076 (16:9)
Velocidad máxima	20 m/s	Formato de Imagen	JPEG / DNG /	JPEG+DNG
Autonomía	40 minutos	Rango ISO	Foto:	ISO100~12800
GNSS	GPS/GLONASS/ VIO/ATTI		(Manual)	

Figura 19.

Aeronave y cámara del UAV Autel Evo II Pro 6k. Tomado de auteldrones.com (Sitio oficial de Autel Robotics).

**6.1.1.2 Plan de vuelo**

Para la planificación del vuelo se hizo un reconocimiento remoto de la zona de estudio con ayuda de las herramientas Google Earth y Autel Explorer, esta última es a su vez la aplicación por defecto de la marca Autel para algunos de sus equipos que permitió establecer los siguientes parámetros:

Tabla 4.

Parámetros de vuelo establecidos.

Parámetro	Valor
Altura de vuelo	90 m
Velocidad de vuelo	29 km/h
Traslape frontal	80%
Traslape lateral	75%
Ángulo del cardán	90°
GSD resultante	1.52 cm/px
Tiempo de vuelo estimado	23 m 25 s
Número de Imágenes estimadas	506
Área estimada	153014 m ²

Figura 20.

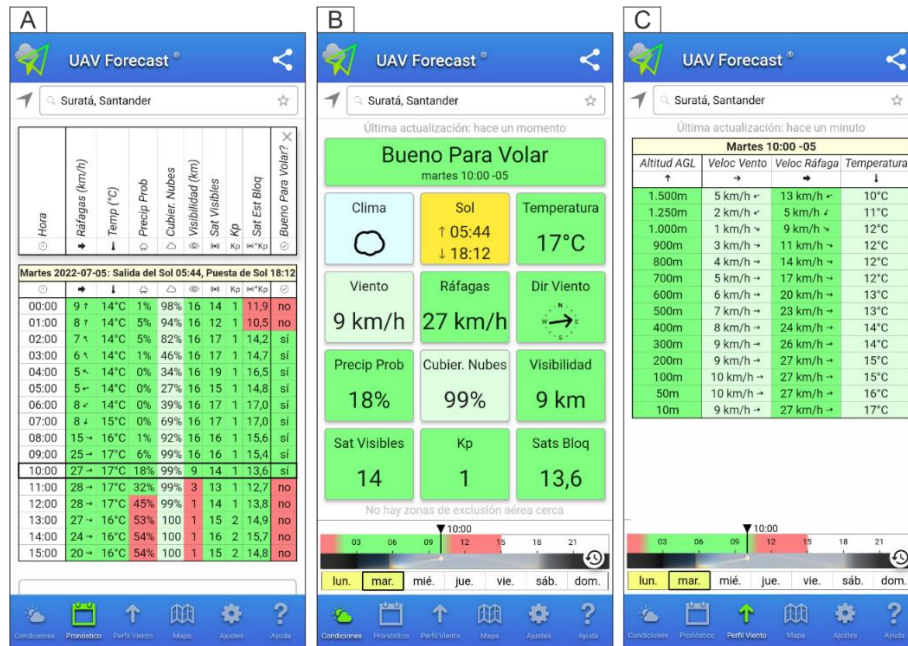
Plan de vuelo elaborado en la aplicación Autel Explorer para el área de estudio.



Adicionalmente, es fundamental tener un conocimiento anticipado de las condiciones meteorológicas a las cuales será sometido el VANT, dichas condiciones se consultaron haciendo uso de la aplicación UAV Forecast con 24 horas de anticipación, con el objetivo de definir la viabilidad de realizar el vuelo y establecer el rango horario apropiado para el mismo.

Figura 21.

Predicción de las condiciones meteorológicas para la zona de estudio según la aplicación UAV Forecast. A) Pronóstico horario para la mañana del día seleccionado. B) Condiciones meteorológicas específicas para las 10 am. C) Perfil del viento para las 10 am.



En la figura 21-A se observa el pronóstico meteorológico desde las 00:00 hasta las 15:00 del día escogido, las condiciones se muestran favorables desde las 2:00 hasta las 11:00. Para establecer el rango horario adecuado se tuvo en cuenta que debe haber la menor cantidad de sombra, y que la luminosidad debe ser lo más constante posible. Por lo tanto, se debe pretender proceder lo más próximo al mediodía solar, donde los rayos del sol son más perpendiculares a la superficie de la tierra y la sombra es menor. Dado esto, se eligió como franja horaria para ejecutar el vuelo de 10:00 a 11:00.

La figura 21-B muestra el pronóstico específico para las 10:00. La velocidad del viento será de 9 km/h con ráfagas de 27 km/h (lo cual no es problema para el VANT elegido ya que soporta vientos de hasta 74 km/h según el fabricante) en dirección W-E, precipitación probable del 18%, cobertura

de nubes del 99%, visibilidad de 9 km, 14 satélites visibles, temperatura de 17°C y un índice de tormenta geomagnética (Kp) de 1, cifras aptas para el correcto funcionamiento del VANT y su cámara.

La aplicación también permitió ver el perfil del viento para la hora elegida (Figura 21-C), se observa que para la altura a la cual se planea volar (90 m) la velocidad del viento y las ráfagas serán de 10 y 27 km/h respectivamente, lo cual es favorable.

6.2 Segunda Etapa: Trabajo de Campo

Esta fase se realizó en distintas visitas a la zona, en las primeras visitas al área se hizo un acercamiento a algunos de los mineros artesanales presentes en el sector con el objeto de asimilar sus técnicas exploratorias y productivas. Esta fase finalizó con tres días de campo, en los que se recorre el río California analizando los tramos del río en que se les facilita trabajar a los mineros y reconociendo en campo las geoformas y condiciones del terreno que facilitan la formación de depósitos, para esto se tomaron 24 estaciones describiendo las variables establecidas en el marco teórico (Apéndice A). Por último, se realizó el levantamiento fotogramétrico con el drone, para lo cual previamente se validó la siguiente lista de chequeo:

1. Se revisó el plan de vuelo establecido anteriormente, no fue necesario hacer cambios ya que no se observaron obstáculos o elementos que interfirieran en el correcto curso del vuelo, garantizándose las condiciones de seguridad operacional.
2. Se analizaron los factores meteorológicos influyentes en la posibilidad de realizar el levantamiento, las condiciones fueron óptimas.
3. Se comprobaron las condiciones humanas, los operarios se encontraron aptos para la realización del trabajo.
4. Se revisó la conectividad del dron con los satélites (16 en promedio) y con el control.

5. Se corroboró el estado de las baterías, todas completamente funcionales y con un 100% de carga.
6. Se insertó la unidad de almacenamiento microSD con 32GB de espacio para el acopio de la información.
7. Se calibró la brújula y la IMU (unidad de medición inercial).
8. Se escogió una zona despejada y libre para el despegue y aterrizaje.

Luego de verificar lo anteriormente mencionado, se procedió a ejecutar el vuelo autónomo. Se ubicó el VANT en su pista de despegue, y desde el mando (haciendo uso de su aplicación Autel Explorer) se dio inicio a la misión. Durante la ejecución el piloto y su observador estuvieron alerta de su correcto desarrollo. Para efectuar el plan de vuelo fotogramétrico establecido fue necesario realizar 2 vuelos, ya que la autonomía de 1 batería no fue suficiente y se debió hacer un retorno al punto de partida para instalar otra completamente cargada. En total, la ejecución del plan de vuelo tardó 34 minutos y 17 segundos, fueron capturadas 505 imágenes en formato JPEG y no se presentaron novedades técnicas, meteorológicas, ni de ninguna otra índole. La tarea concluyó con un aterrizaje exitoso.

Además, piloteando el VANT de forma manual se capturaron 21 imágenes con ángulos entre los 45-70° y alturas de 50-90 metros, con el fin de obtener información de zonas del cauce con espesa cobertura vegetal.

Tras adquirir toda la información necesaria, se procedió a verificar el estado del equipo y posteriormente a guardarlo en su contenedor. Finalmente, se realizó un control de calidad de los insumos en campo.

6.3 Tercera Etapa: Análisis, Digitalización e Interpretación de Resultados

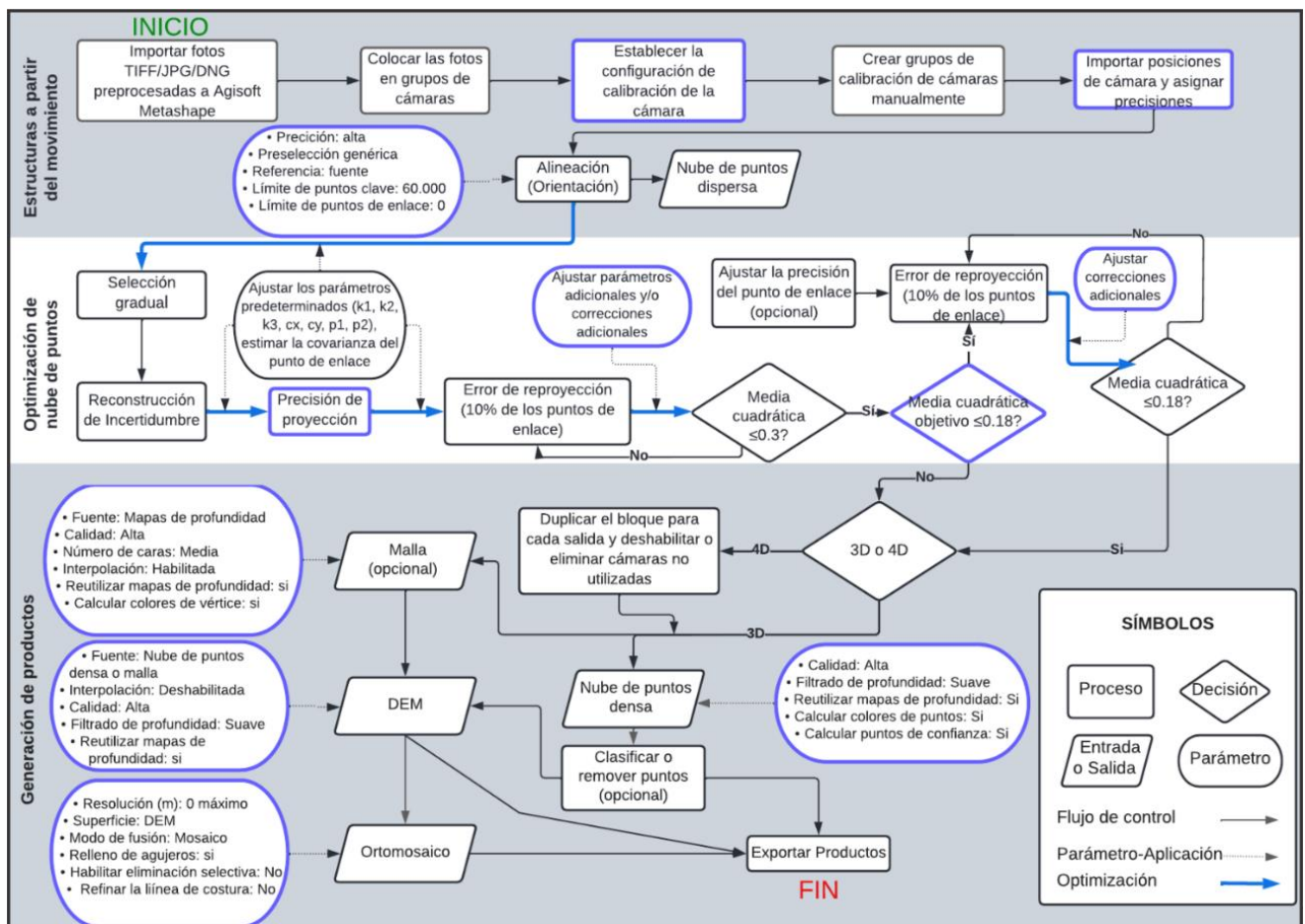
En esta etapa fue procesada y analizada a detalle la información adquirida en los levantamientos cartográfico y fotogramétrico hechos en campo.

6.3.1 Procesamiento de las imágenes aéreas

El procesamiento de las fotografías capturadas con el drone se realizó en el software Agisoft Metashape Professional en su versión 1.3.8 y se siguió el flujo de trabajo recomendado por Over, J.R. et al., 2021 (Figura 22).

Figura 22.

Diagrama esquemático que resume un flujo de trabajo utilizado en Agisoft Metashape Professional. Tomado y modificado de Over, J.R. et al (2021).



El procesamiento se llevó a cabo de la siguiente manera:

6.3.1.1 Estructuras a partir del movimiento.

1. Revisión de calidad inicial: Se hizo una depuración de las imágenes a las que se les identificó problemas como baja calidad y duplicados, en total fueron omitidas 41 fotos.
2. Importación de fotografías: se importó un total de 485 imágenes con sistema de coordenadas WGS 84 (EPSG:4326), de las cuales 464 corresponden a fotos tomadas durante el vuelo autónomo del VANT y 21 a fotos capturadas en modo manual. En la figura 23 se observa que geográficamente se ubican sobre la zona de estudio.

Figura 23.

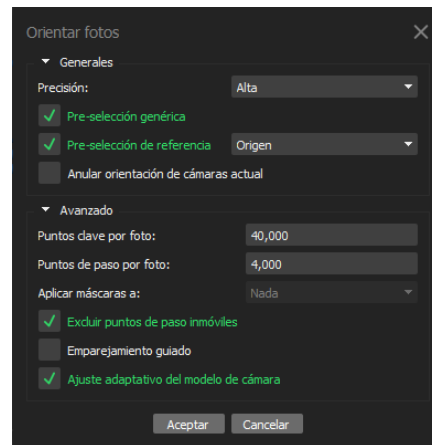
Cámaras importadas ubicadas geográficamente sobre la zona de estudio. Se observan las fotos tomadas durante el vuelo autónomo (azul) y las fotos tomadas de forma manual (rojo).



3. Alineación (Orientación): importadas las posiciones de las cámaras, se asignaron los parámetros como se muestra en la figura 24, y posteriormente se orientaron las imágenes.

Figura 24.

Parámetros establecidos para la orientación de las imágenes aéreas.



En total fueron orientadas 446 de 485 fotos, para las 39 imágenes no orientadas el software no detectó puntos en común debido a la cercanía del vuelo respecto a la superficie capturada y, por consiguiente, la limitada área en común entre fotografías. Sin embargo, esto no afectó los productos pues están fuera del área de interés. Se obtuvo una nube de puntos de paso o nube de puntos dispersa (Figura 26) con 121,125 puntos de calidad alta.

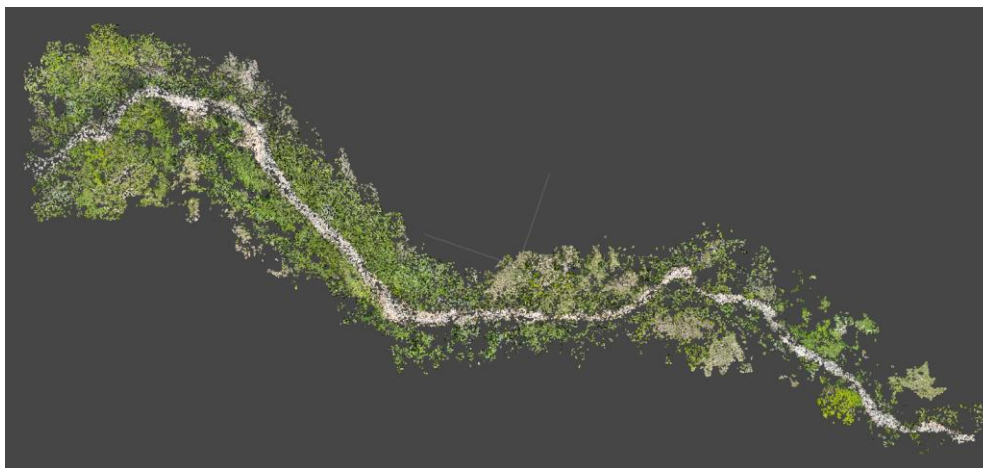
Figura 25.

Cámaras exitosamente orientadas (azul) y cámaras no orientadas (blanco), se observa que la orientación tuvo problemas hacia las zonas externas el polígono de vuelo debido a las alturas topográficas presentes.



Figura 26.

Nube de puntos de paso generada tras la orientación de las imágenes aéreas.

**6.3.1.2 Optimización de la nube de puntos.**

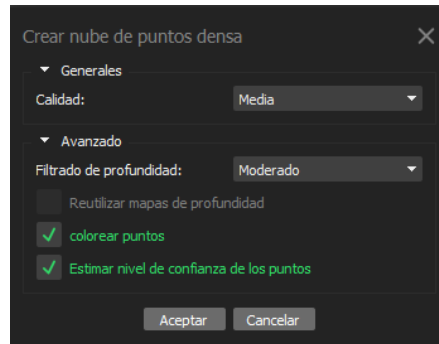
Se realizó una selección gradual de los puntos que presentaron anomalías en su posición, siendo considerados como ruido y eliminados. La nube de puntos dispersa resultante fue de 121,096 puntos. A pesar que el error medio cuadrático de reproyección fue <0.18 (0.183239 (2.21 pix)), se hizo un ajuste de los parámetros $k1$, cx , cy , $p1$ y $p2$, y una estimación de la covarianza de los puntos de enlace con lo cual se disminuyó el error a 0.159814 (2.13 pix).

6.3.1.3 Generación de productos.

1. Nube de puntos densa: el siguiente paso en el flujo de trabajo fue crear la nube de puntos densa, la cual se generó a partir de la nube de puntos de paso optimizada. Los parámetros aplicados para su creación se muestran en la figura 27. Como resultado, se obtuvo una nube de puntos densa con 48,947,448 puntos, una calidad media y un nivel de filtrado moderado. A esta nube de puntos obtenida se le realizó una clasificación automatizada de los puntos del terreno, como parámetros se ajustó un ángulo máximo de 15° , distancia máxima de 0.1 m y tamaño de la celda de 30 m. Posteriormente se hizo una clasificación manual para refinar el resultado.

Figura 27.

Parámetros establecidos para la creación de la nube de puntos densa.

**Figura 28.**

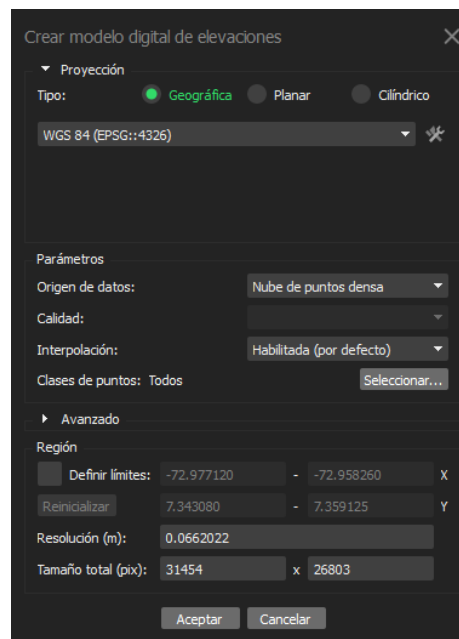
Nube de puntos densa generada a partir de la nube de puntos dispersa.



2. Modelo digital de elevaciones (DEM): se utilizó la información obtenida en la nube de puntos densa no clasificada y se aplicaron los parámetros mostrados en la figura 29 para procesar y obtener un modelo digital de elevaciones, que a su vez es un modelo digital de superficies (DSM) con resolución de 6.62 cm/pix. Se realizó el mismo procedimiento usando sólo la clase de puntos pertenecientes a terreno de la nube clasificada para generar un modelo digital del terreno (DTM) de igual resolución.

Figura 29.

Parámetros utilizados para la generación del modelo digital de elevaciones.

**Figura 30.**

Modelo digital de superficies obtenido a partir de la nube de puntos densa.

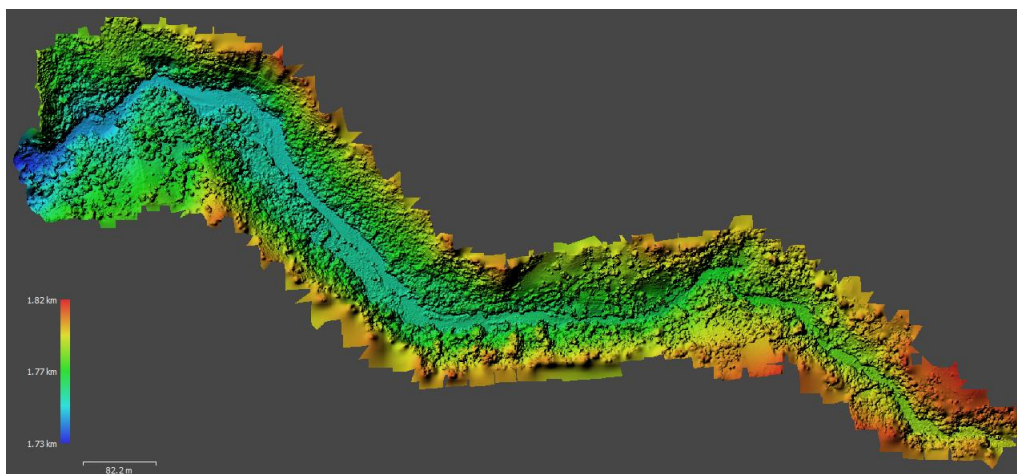
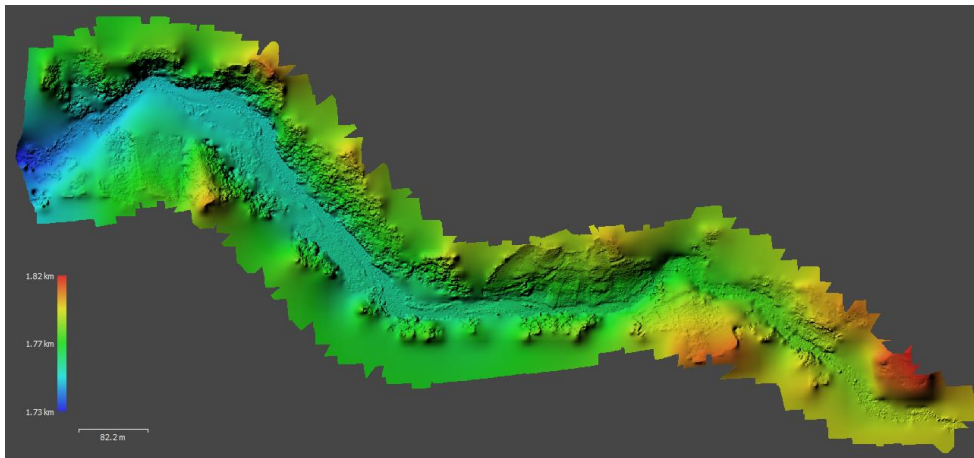


Figura 31.

Modelo digital del terreno obtenido a partir de la nube de puntos densa clasificada.



3. Ortomosaico: El ortofotomosaico fue el último de los productos en generarse, fue creado a partir del DEM y para ello se establecieron los parámetros que se observan en la figura 32.

Figura 32.

Parámetros utilizados para crear el Ortomosaico de la zona de estudio.

Crear ortomosaico

Proyección

Tipo: Geográfica Planar Cilíndrico

WGS 84 (EPSG:4326)

Parámetros

Superficie: MDE

Modo de mezcla: Mosaico (por defecto)

Refinar líneas de costura

Permitir el cierre de agujeros

Habilitar el filtro de efecto fantasma

Ocultar vista de caras invertidas

Tamaño de píxel (deg): 1.49857e-07 X

Metros... 1.4961e-07 Y

Máx. dimensión (pix): 4096

Región

Definir límites: - X

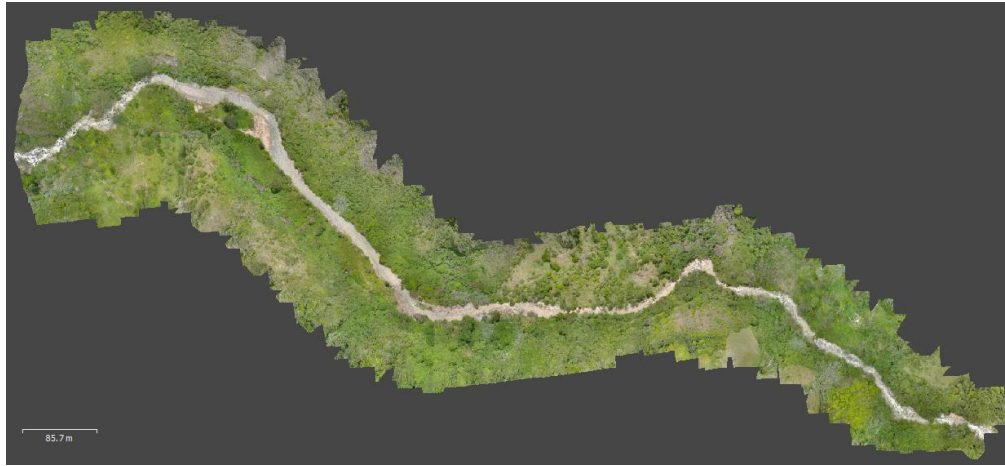
Estimar - Y

Tamaño total (pix): x

Aceptar Cancelar

Figura 33.

Ortomosaico de la zona de estudio generado a partir del modelo digital de elevaciones.



6.3.1.4 Exportación de productos: El último paso de este flujo de trabajo consistió en exportar el Ortomosaico, el DSM y el DTM para su posterior uso y análisis en softwares GIS. Se creó un polígono delimitador con el fin de recortar los bordes irregulares y con bajos niveles de confianza (Figura 34). Finalmente, los productos se exportaron en formato TIFF, con las resoluciones de origen y en sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS/ Colombia Bogotá Zone (EPSG:3116).

Figura 34.

Polígono delimitador usado para recortar los productos al momento de ser exportados.



6.3.2 *Parámetros para el análisis multicriterio*

Para la determinación de las zonas con mayor potencial de formación de depósitos se realiza un análisis multicriterio, considerando los diferentes parámetros descritos en el marco teórico, dichos parámetros se categorizan según el grado de favorabilidad de 1 a 5, donde 1 es poco favorable y 5 es muy favorable, es importante aclarar que las clasificaciones aquí usadas se toman de forma arbitraria a criterio de los autores dado que no se encontró información al respecto. Finalmente, se evalúan los diferentes criterios, cruzando la información y ponderando conforme a la importancia de cada variable implicada en el proceso. Los criterios a utilizar por su parte derivan de los productos del drone y la implementación de herramientas GIS en el software ArcGIS Pro, como se describe a continuación:

6.3.2.1 Mapa de pendientes: La generación del mapa de pendientes se realiza con base en el DTM, sin embargo, la resolución del DTM es alta, por lo que es necesario eliminar ruido que producen elementos muy pequeños, para ello se extraen las curvas de nivel con la herramienta *Contour* cada metro y se eliminan aquellas curvas cuya longitud es menor a 10 metros. A continuación, se crea un nuevo DEM en base a las curvas de nivel y se ejecuta la herramienta *Slope* con lo que se obtiene el raster de pendientes en grados, este último se reclasifica de la siguiente manera:

Tabla 5.

Clasificación de pendientes según la favorabilidad para la acumulación de depósitos.

Pendiente (°)	Valor	Clasificación
≤ 4	5	Muy Favorable
$4 < x \leq 8$	4	Favorable
$8 < x \leq 15$	3	Moderadamente favorable
$15 < x \leq 30$	2	Poco favorable
$30 < x \leq 90$	1	No favorable

6.3.2.2 Curvatura del cauce. La información de las curvas del cauce se obtiene haciendo uso de el software ArcGIS, y su herramienta para realizar mediciones COGO (Geometría de coordenadas). Para esto, en el componente ArcMap se crea una capa shapefile tipo línea a la cual se le adicionan a su tabla de atributos los campos COGO a través de la aplicación ArcCatalog. Posteriormente, teniendo el Ortomosaico como base visual, se trazan las curvas de interés pertenecientes a la zona de trabajo y se utiliza la herramienta *Actualizar Atributos COGO* para adicionar la información de cada segmento de curva a la tabla de atributos de la capa shapefile. Con esto se obtiene información sobre dirección (ángulo de la cuerda), distancia (longitud de cuerda), delta (grado de apertura), radio, tangente, longitud de arco y sentido de cada una de las curvas que representan la sinuosidad del cauce. Para clasificar el grado de favorabilidad de cada curva se tuvo en cuenta el tamaño del radio (en metros) y el grado de apertura (°) como se observa en las tablas 6 y 7 respectivamente. Para cada uno de estos 2 atributos se generó una capa shapefile, con el fin de facilitar la interpolación de información respecto a las demás capas generadas.

Tabla 6.

Clasificación de los radios de curva según la favorabilidad para la acumulación de depósitos.

Radio de la Curva (m)	Valor	Clasificación
≤ 20	3	Favorable
$20 < x \leq 40$	2	Moderadamente favorable
>40	1	Poco favorable

Tabla 7.

Clasificación de los ángulos de curva según la favorabilidad para la acumulación de depósitos.

Ángulo de apertura (°)	Valor	Clasificación
≤ 45	1	Poco favorable
$45 < x \leq 90$	2	Moderadamente favorable
>90	3	Favorable

6.3.2.3 Obstáculos: Para la obtención de los obstáculos se prueba la herramienta de clasificación supervisada *Maximun Likelihood Classification* la cual se encuentra en la extensión *Spatial Analyst Tools* en la sección *Multivariate*. El uso de esta herramienta consta de los siguientes pasos:

- Primero se crea un archivo shapefile (*.shp*) tipo polígono que contiene las clases (Agua, Depósitos, Vegetación, Obstáculos), el cual se digitalizó sobre el ortomosaico asegurando el suficiente número de polígonos por clase para que haya mayor diferenciación entre las firmas de cada clase (Figura 35).
- Posteriormente en la herramienta *Create Signatures* se ingresa tanto el ortomosaico, como el archivo shapefile (*.shp*) de clases y se obtiene un archivo (ASCII con formato *.gsg*) que contiene las firmas para cada clase (Figura 36a), en base a los valores de píxeles que extrae la herramienta del ortomosaico.
- Finalmente, con la herramienta de clasificación supervisada se obtiene un primer raster de las clases buscadas (Figura 36b).

Figura 35.

Creación de polígonos para las clases establecidas.

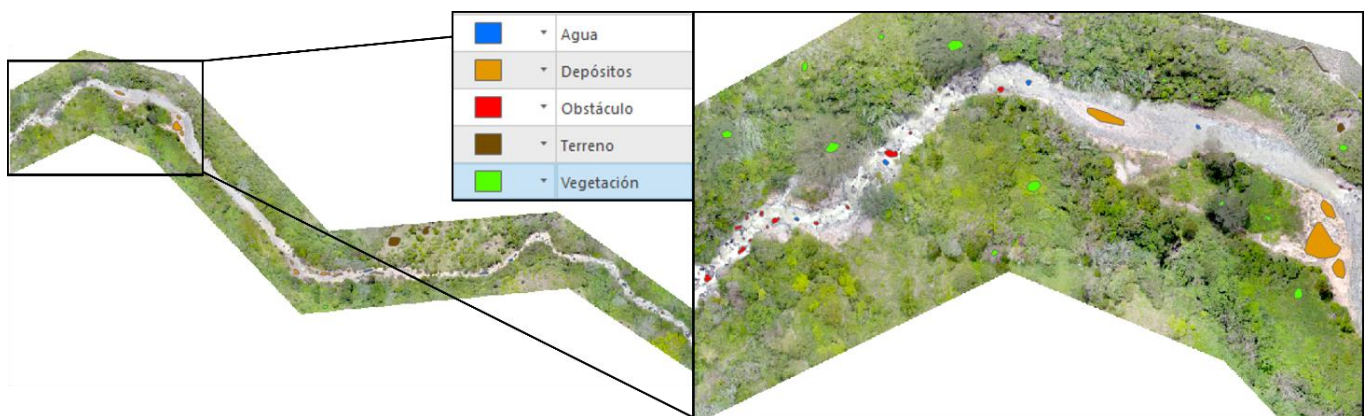
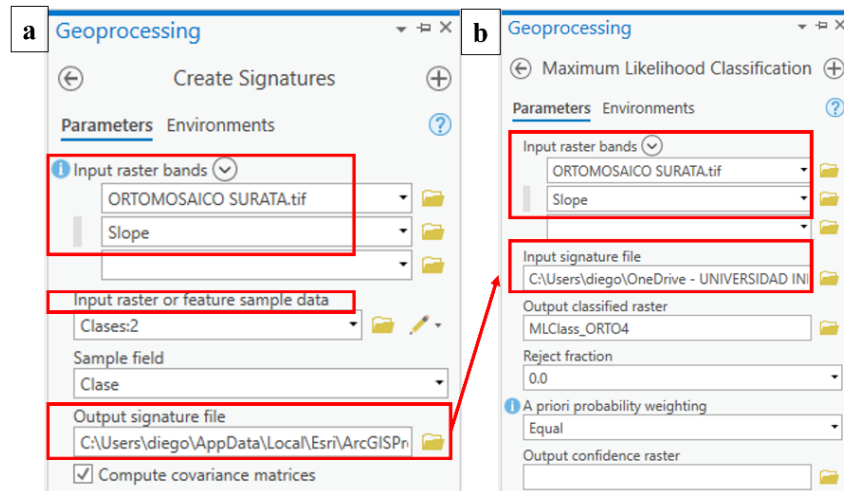


Figura 36.

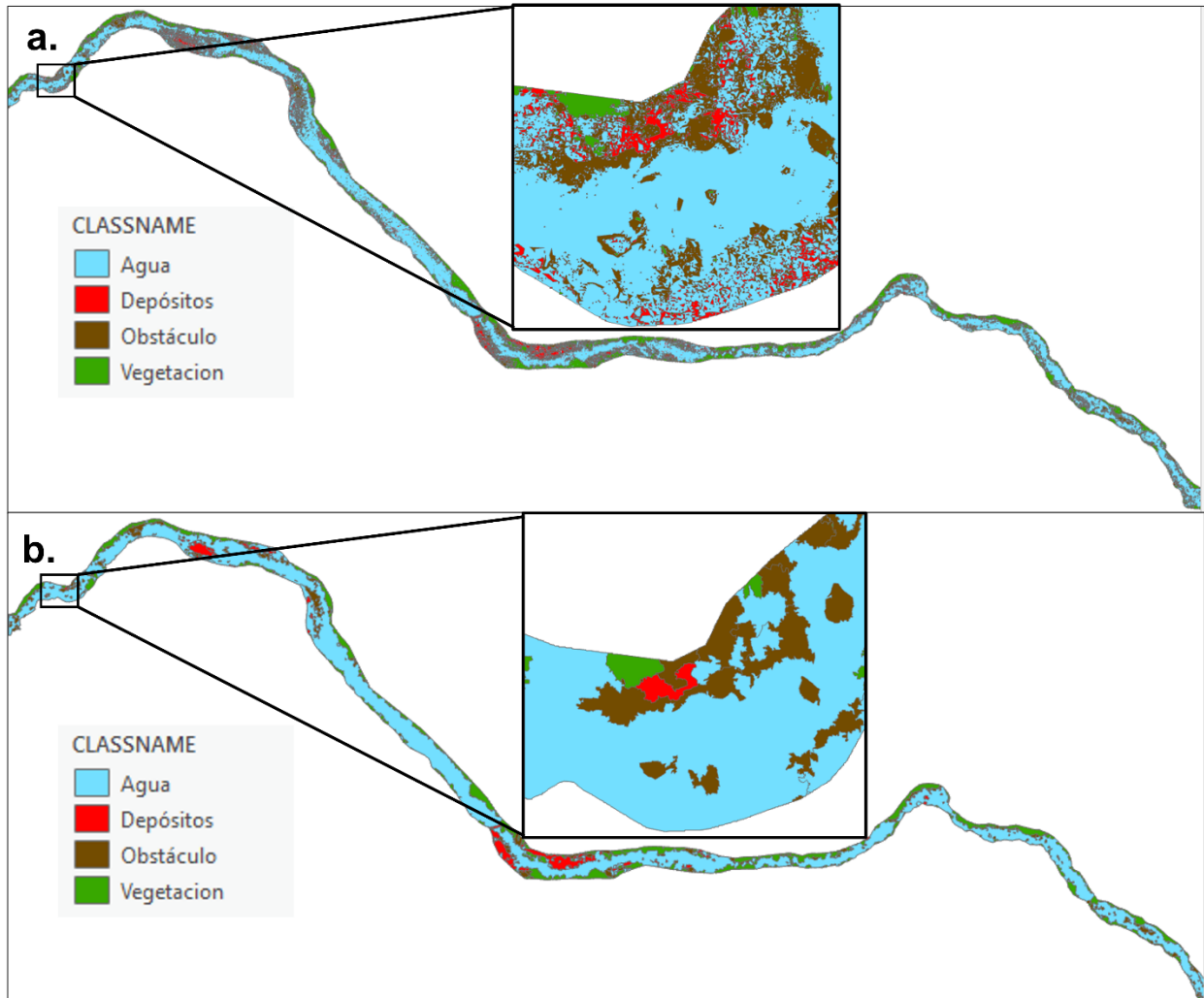
Procesamiento: a. Ejemplo de creación de firmas ingresando diferentes rasters y el shp de clasificación creado (Clases); b. Clasificación supervisada en base la firma previamente creada.



El raster de salida contiene un gran número de píxeles mal asignados (Figura 37a) por diversas razones que se analizan en la sección de discusión. Por esta razón es necesario generalizar el raster clasificado, limpiando o eliminando los polígonos muy pequeños que están mal asignados y que generan ruido, para ello se convierte el raster a un archivo shape de polígonos, se calculan las áreas de los polígonos y se procede a eliminar los polígonos menores a 1 metro cuadrado (Figura 37b) por medio de la herramienta *Eliminate* que los asigna a la zona mayor área al polígono eliminado, adicionalmente fue necesario recortar el área al ancho del cauce para facilitar el proceso de limpieza.

Figura 37.

a. Clasificación supervisada cruda, b. Clasificación supervisada corregida.



En principio se pretendía extraer los obstáculos de la clasificación supervisada para usarlos en el análisis multicriterio, sin embargo se observa imprecisión en estos resultados por lo que se opta por realizar manualmente la digitalización de los obstáculos más importantes, para ello se crea un archivo shapefile tipo polígono que contenga información del área y tipo de obstáculo, es decir se tendrán en cuenta salientes y rocas de tamaño apreciable que se encuentren dentro del cauce, en base a esto se le asignará un valor de 1 a 3 según el nivel de favorabilidad que presenten en la formación de depósitos.

6.3.2.4 Depósitos: Sobre el ortomosaico se realiza un análisis visual de los depósitos aluviales y se digitalizan en un archivo shapefile que posteriormente se rasteriza. Estos indiscutiblemente son zonas de gran interés ya que representan la dinámica actual del cauce como zonas de acumulación, por esta razón se le asigna el valor más alto (5) de la clasificación previamente mencionada.

6.3.3 *Análisis Multicriterio*

El análisis multicriterio, como su nombre lo indica, trata de evaluar diferentes variables asignándole un peso ponderado a cada una. Cada variable debe estar en formato raster y contener la clasificación según el nivel de favorabilidad para la formación de depósitos aluviales como se estableció en los pasos anteriores, de igual manera, el raster de salida va a estar clasificado en la misma escala de acuerdo al cruce de la información.

Dado que no hay documentación sobre los correctos porcentajes para cada capa, se repite cuatro veces el procedimiento variando el grado de influencia de cada una de acuerdo a la siguiente tabla y los resultados correspondientes a cada caso se muestran en la figura 49.

Tabla 8.

Distribución de pesos ponderados para cada criterio.

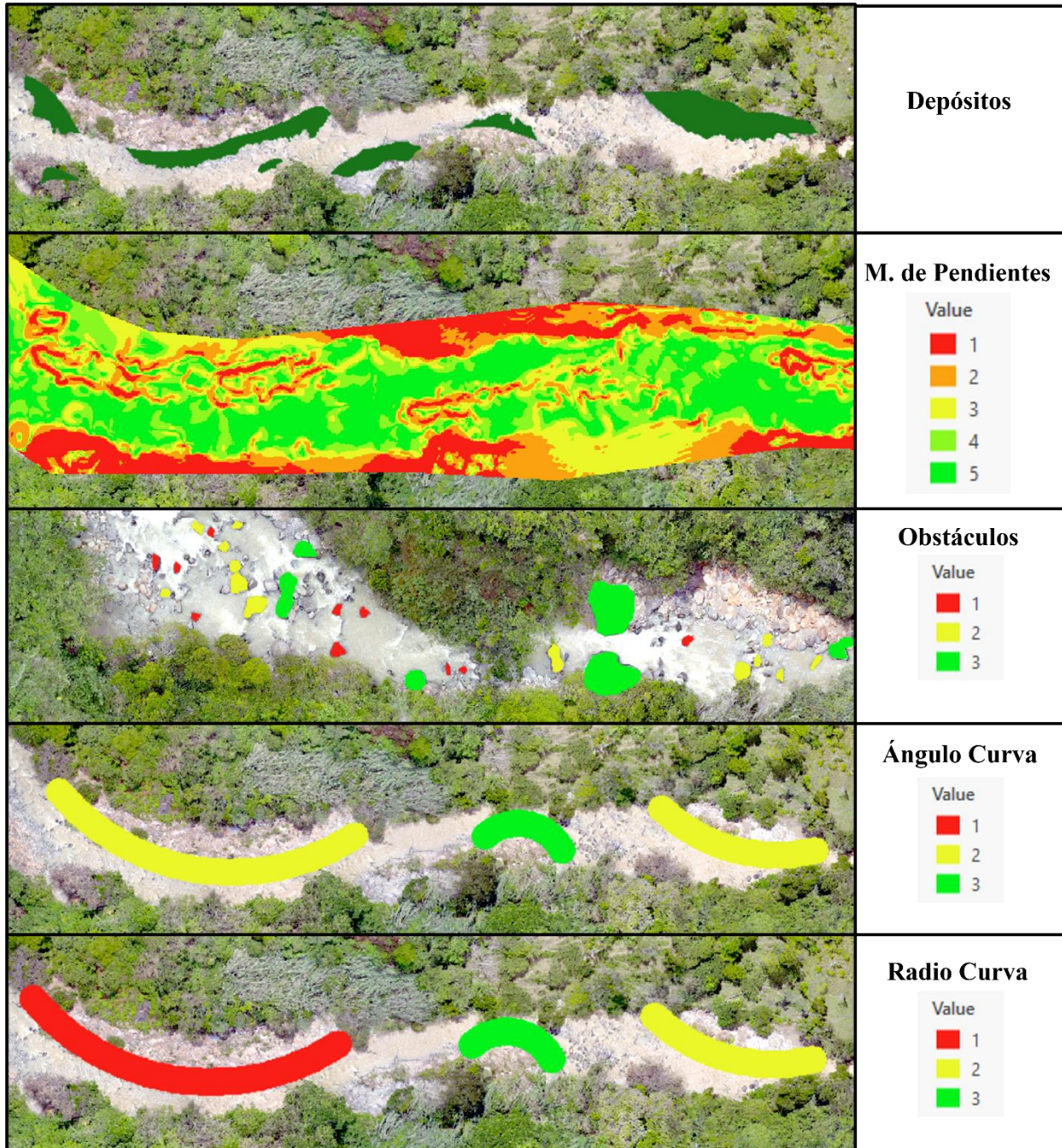
Parámetro	a. Peso (%)	b. Peso (%)	c. Peso (%)	d. Peso (%)
Depósitos	30	35	35	30
Pendiente	25	20	20	23
Obstáculos	20	15	25	20
Angulo de curva	13	17	10	15
Radio de curva	12	13	10	12

El análisis multicriterio se realiza con la herramienta *Weighted Overlay* en donde se ingresan las variables y se les asigna tanto el peso ponderado (%) como un valor de escala a las clases contenidas en las variables para el remuestreo del mapa de salida, esta escala va de de 1 a 5 según el nivel de importancia, es decir que aquellos parámetros clasificados de 1 a 3 (Curvatura y

Obstáculos) se les asigna un valor de escala de 3 a 5 respectivamente para que su valor de importancia no se vea afectado y a los espacios vacíos (NO DATA) se le asigna el mínimo valor de importancia (1) para evitar vacíos en la capa de salida.

Figura 38.

Representación de las variables usadas en el análisis Multicriterio.



6.4 Cuarta Etapa: Generación y Socialización de Productos

Por último, se generó el mapa de favorabilidad de formación de depósitos del tramo del río California seleccionado para el presente estudio (Apéndice B), donde se indicaron las zonas con mayor potencial de acumulación del mineral de interés. Además, se diseñó la cartilla didáctica para los barequeros (Figura 39 y Apéndice C), donde se muestran gráficamente las geoformas fluviales que influyen en la concentración de minerales pesados, haciendo fácil su entendimiento. Tanto el mapa como la cartilla son pensados como un complemento para los conocimientos empíricos de los barequeros siendo una herramienta útil para aumentar su producción aurífera. Esta información deberá ser socializada y, posteriormente verificada por los barequeros para comprobar los resultados y realizar los ajustes que se consideren pertinentes.

Figura 39.

Cartilla instructiva para la identificación de geoformas aptas para la formación de depósitos.



7 Resultados

7.1 Trabajo de Campo

7.1.1 *Interacción con los mineros*

Los barequeros mostraron sin problemas el proceso de lavado de arenas. El barequero inicia su labor realizando un cateo sobre alguna zona o depósito que les interese, con esto realizan un sondeo para evaluar la zona y determinar si les es viable trabajarla. Luego de escoger un punto de trabajo, proceden a ubicar dentro del cauce una canaleta de madera que contiene en su interior un tapete atrapamugre, de tal manera que la corriente del río pase sobre la canaleta y vaya lavando el material el cual es agregado a la canaleta con ayuda de una pala, esto corresponde a la primera fase de selección de material donde se eliminan las partículas de mayor tamaño, paso que toma alrededor de 15 a 20 minutos (Figura 40a). Seguidamente se limpia cuidadosamente el tapete sobre la batea y proceden a hacer un lavado más minucioso (Figura 40b), este paso toma entre 5 a 10 minutos según la experticia del barequero, aquí se obtienen dos productos, el oro y las arenas negras (Figura 40c-d) que recolectan en un balde para procesarlas en un molino y obtener algo más de mineral, el proceso se repite hasta culminar su jornada.

Figura 40.

Proceso de barequeo. a. Uso de la canaleta y el tapete atrapamugre; b. Limpieza del tapete sobre la batea; c. Recopilación de arenas negras dentro de un balde; d. Producto final (Oro).

**7.1.2 Geomorfología del cauce del río California**

El río California es tributario del río Suratá, que de acuerdo al IDEAM corresponde a un río en etapa juvenil de montaña media. En el tramo analizado, se observaron depósitos como barras puntuales (Fbp), longitudinales (Fbl) y laterales (Fbla) de tamaño variable y otros atributos como obstáculos que, según su tamaño, ubicación y disposición dentro del cauce, además de otras características, permiten la formación de pequeños depósitos. A continuación, se muestran algunas imágenes con las observaciones de campo:

Figura 41.

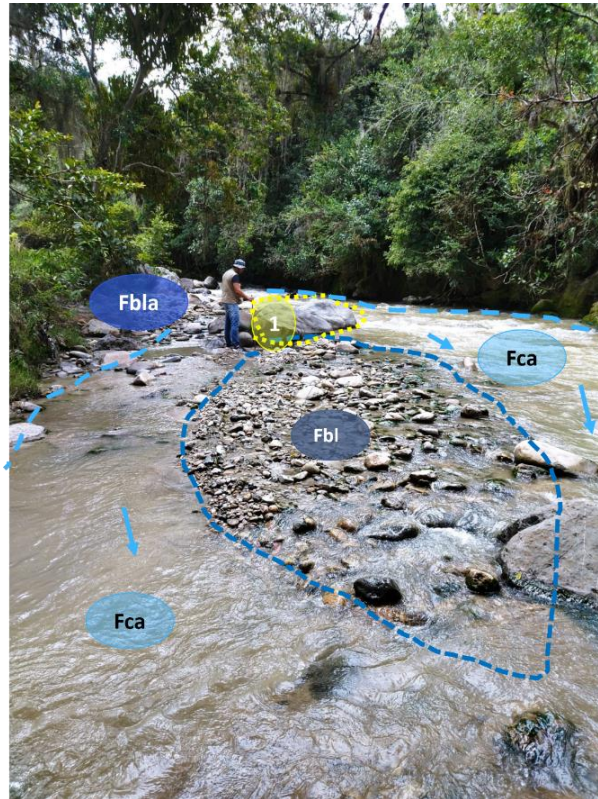
Tramo del río California en donde se observa el Cauce Fluvial (Fca), barras laterales (Fbla), barras longitudinales (Fbl) y barras transversales (Fbt).



Tramo del río California donde se observan diferentes tipos de barras y dinámica fluvial ocasionada por las mismas, al costado derecho en sentido de la corriente se encuentra una barra lateral de unos 10 metros de larga, conformada por detritos heterogéneos en tamaño y composición. Se observan además barras transversales de 1.5 a 2 m de largo, estas barras son recientes y por lo tanto activas, es decir que si el río aumenta su fuerza pueden, o modificarse o arrastrarse completamente de su posición actual. Adicionalmente se encuentran barras longitudinales de distinto tamaño, una de ellas presenta vegetación por lo que se asume que es más antigua.

Figura 42.

Barras laterales (Fbla) y longitudinales (Fbl), esta última con influencia de un obstáculo (1) o Fbt.



Tramo del río con presencia de depósitos tipo barra lateral y longitudinal heterogéneas en el tamaño de los detritos, posicionadas al costado derecho en sentido de la corriente. El costado izquierdo por su parte corresponde a la zona de erosión del río en este sector, ya que es la zona de mayor fuerza del cauce.

Figura 43.

Tramo del río California con barras laterales (Fbla), obstáculos o Fbt y zona de rápidos.



Tramo del río donde se observa una zona de rápidos (2) por un cambio de pendiente del cauce. Por otro lado, se observan salientes o clastos de gran tamaño transversales al cauce.

En otros sectores se evidencian zonas que han sido trabajadas por lo mineros tanto en tramos con vegetación como depósitos a borde de río (Figura 44), en otros sectores estas zonas parecen de alta intervención antrópica (Figura 45).

En general se destaca la variabilidad de depósitos y tamaño de clastos que los conforman, pudiendo notar que su formación está sujeta a diversos factores, algunos de ellos se analizan en la sección de discusión.

Figura 44.

Tramo del río California. 1: Zonas trabajadas por los mineros; Fbla: Barras laterales; Fca: Cauce aluvial.



Figura 45.

Tramo del río California con zonas de intervención antrópica (1).



7.2 Trabajo de Oficina

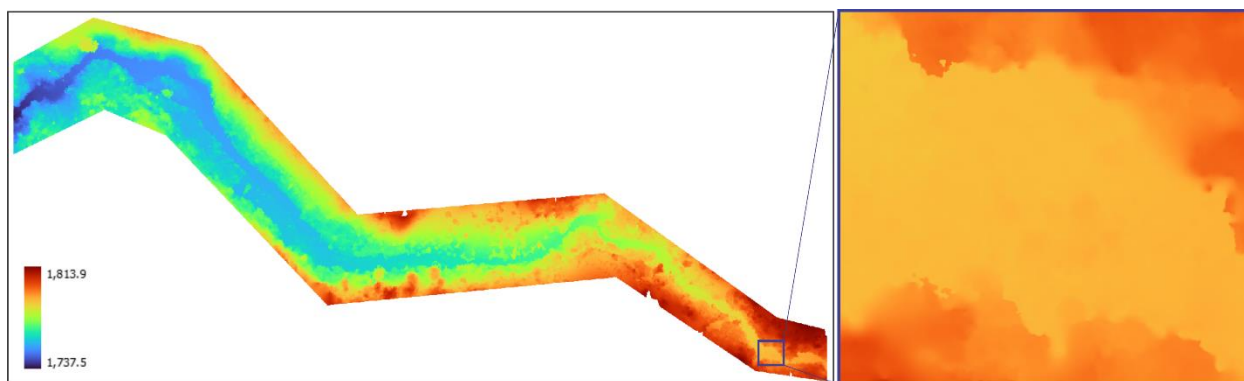
7.2.1 Productos drone

El levantamiento fotogramétrico realizado con el VANT y el posterior procesamiento de sus imágenes dio lugar a los siguientes productos.

1. Modelo Digital de Superficies (DSM): El DSM exportado del software tiene una resolución de 6.62 cm/pix, dimensiones de 15773x7013 píxeles, formato TIF, sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS/Colombia Bogotá Zone (EPSG:3116) y un tamaño de 107 MB.

Figura 46.

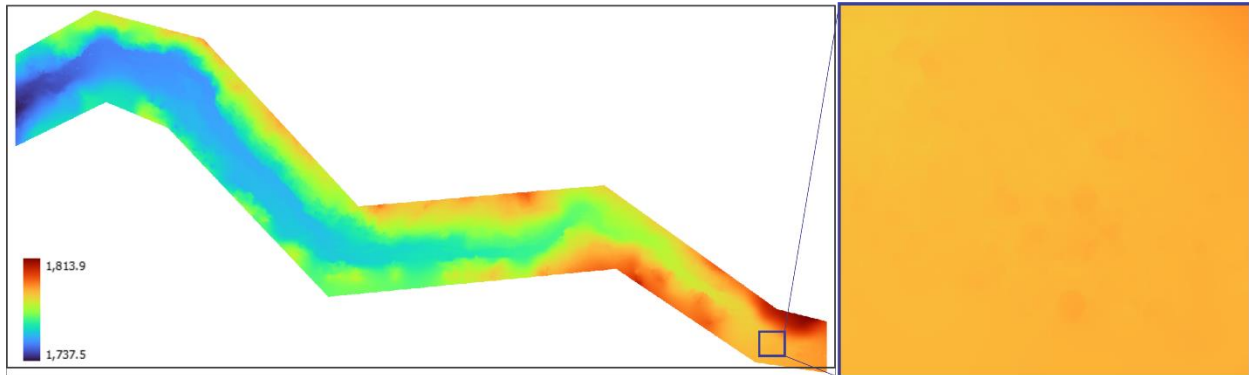
Modelo digital de superficies (izquierda), acercamiento a escala 1:120 del DSM (derecha).



2. Modelo Digital del Terreno (DTM): El DTM resultante comparte características con el DSM: una resolución de 6.62 cm/pix, dimensiones de 15773x7013 píxeles, formato TIF, sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS/Colombia Bogotá Zone (EPSG:3116) y posee un menor tamaño: 104 MB.

Figura 47.

Modelo digital del terreno (izquierda), acercamiento a escala 1:120 del DTM (derecha).



3. Ortomosaico: El Ortomosaico obtenido tiene una resolución de 1.66 cm/pix, dimensiones de 63094x28053 píxeles, 3 bandas (RGB), formato TIF, sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS/Colombia Bogotá Zone (EPSG:3116) y un tamaño de 2.11 GB.

Figura 48.

Ortomosaico (izquierda), acercamiento a escala 1:120 del Ortomosaico (derecha).

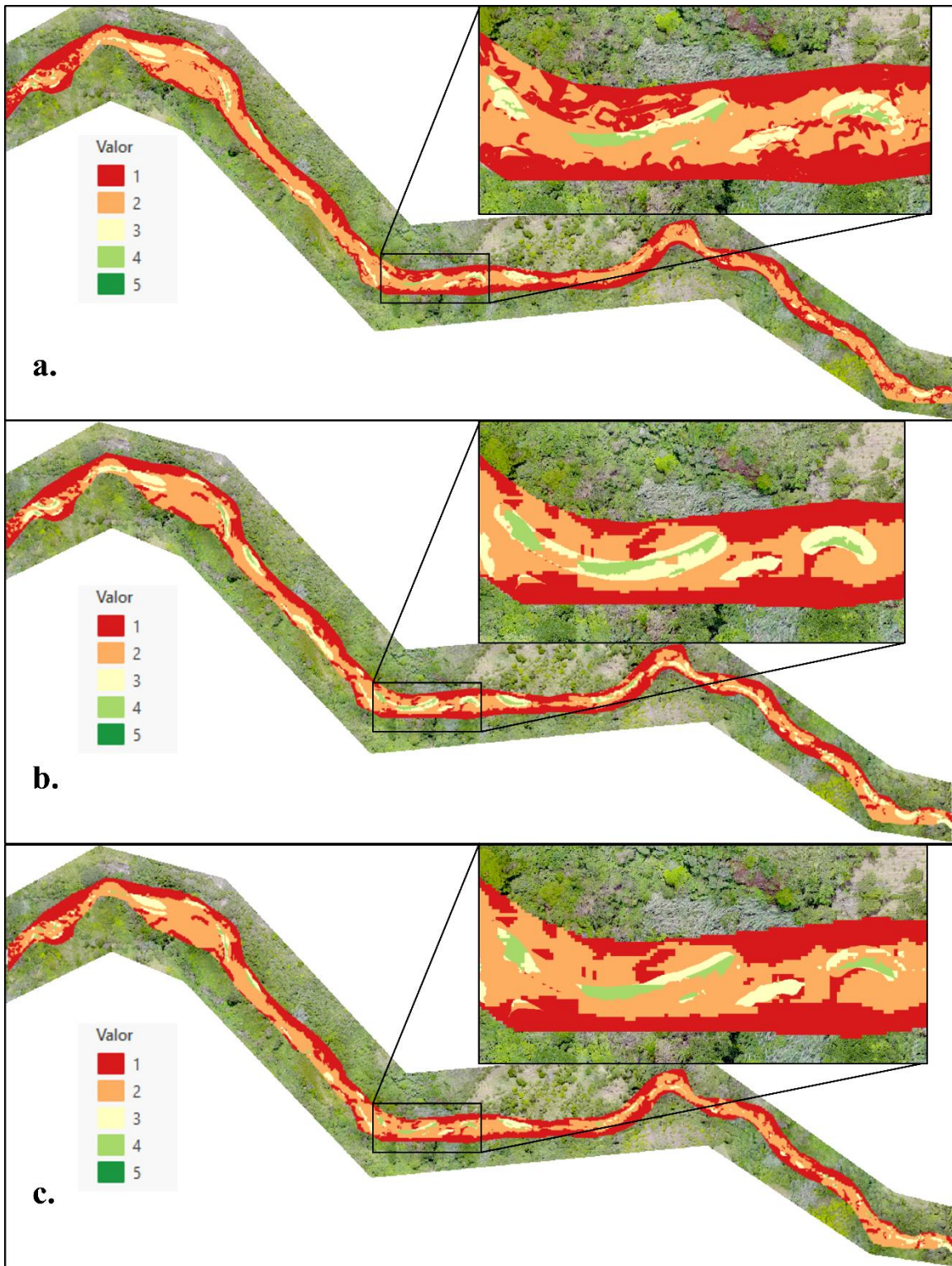


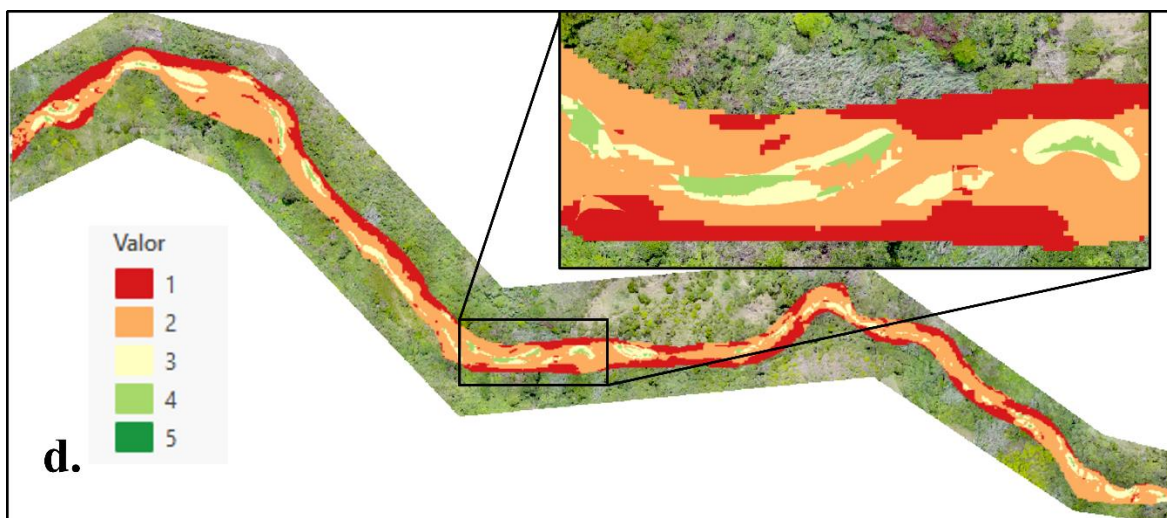
7.2.2 Productos GIS – Análisis Multicriterio

El raster obtenido en el cruce multicriterio presentado en la tabla 8 se representa en la figura 49, se mantiene la clasificación de 1 a 5 según el factor de favorabilidad para la formación de depósitos.

Figura 49.

Mapa de análisis multicriterio del tramo del Río California de acuerdo a los porcentajes de la Tabla 8.





7.3 Correlación de resultados en campo

El mapa de favorabilidad de formación de depósitos aluviales fue cotejado respecto a información adquirida en la fase final de campo. Para esto se estableció estratégicamente un total 12 puntos (Apéndice B) con una clasificación conocida según la metodología propuesta en el estudio, donde para cada clase presente fueron analizados 4 puntos. En cada uno de estos se realizó un cateo, ejecutado por mineros artesanales de la comunidad de Suratá, quienes hicieron una estimación del grado de productividad de cada una de estas zonas basados en su criterio y su experiencia. La calificación de estos puntos se fundamentó en parámetros cualitativos y para su evaluación se usó una escala de 1-10, siendo 10 el mejor prospecto.

Tabla 9.

Concordancia entre los valores de los puntos cateados en campo y la clasificación en el mapa de favorabilidad de formación de depósitos aluviales.

Punto	Valor en campo	Clasificación en el mapa	Concordancia	
1	3	4	Favorable	No
2	6	2	Poco favorable	No
3	3	3	Moderadamente favorable	No
4	2	2	Poco favorable	Si
5	3	2	Poco favorable	Si
6	4	3	Moderadamente favorable	Si
7	5	4	Favorable	Si
8	2	2	Poco favorable	Si
9	7	3	Moderadamente favorable	Si
10	3	3	Moderadamente favorable	No
11	6	4	Favorable	Si
12	8	4	Favorable	Si

8 Discusión

8.1 Observaciones de campo

Los acrónimos usados se basan en el “Glosario de Términos Geomorfológicos” del Servicio Geológico Colombiano, 2015. Sin embargo, no se encuentra nomenclatura para barras laterales y transversales, por lo que se usa de manera informal *Fbla* y *Fbt* respectivamente. De igual manera, se llama *Fbt* a la disposición de obstáculos (cantos, guijarros, etc.) perpendiculares o casi perpendiculares al río, que cambian la dinámica de la corriente y ocasionan la depositación de material más fino a sotavento de dicha barra. La forma de los depósitos asociados a estas barras varía según la posición de la misma en el cauce aluvial, si está en una orilla a modo de saliente, el depósito se acomodará a sotavento de la barra y al costado del cauce, pudiendo con el tiempo formar barras laterales mientras que, si la *Fbt* está dentro del cauce, se podrán formar barras longitudinales (*Fbl*) dado que *Fbt* divide la dirección principal de la corriente y a sotavento de *Fbt* se encontrarán estos dos nuevas corrientes depositando sedimentos (Figura 41).

Es de aclarar que la formación de *Fbl* o *Fbla*, no dependen exclusivamente de las *Fbt*, además que la dinámica fluvial es muy compleja, y existen otras variables influyentes en la formación de depósitos. Ejemplo de esto se observa en la figura 42, donde hay depósitos longitudinales y laterales, pero no hay barras transversales. Otro ejemplo de formación de barras laterales (*Fbla*) se presenta en la figura 43, donde se reconocen dos salientes (1) a ambos lados del cauce ocasionando que este último se adelgace en ese punto y a la salida se ensanche, en este cambio de anchura del río, el cauce pierde energía y genera corrientes oscilantes hacia los bordes en donde se depositan los sedimentos.

Por otro lado, se observa que no todos los obstáculos dentro del cauce presentan depósitos asociados, ya que la formación de estos depende tanto de las condiciones de energía del cauce circundante, como de la posición y las dimensiones del obstáculo. Es decir que, si el obstáculo está transversal al cauce, funciona como un *Fbt*, y la posibilidad de formación de depósitos será mayor. Sin embargo, la cantidad de obstáculos grandes concentrados dentro del cauce puede indicar una zona de “rápidos”, zona donde la energía del cauce es muy elevada por un cambio local en la pendiente y la depositación de material se dificulta.

En este sentido, se encuentran depósitos asociados a obstáculos dentro del cauce, pero son pequeñas acumulaciones de material que permanecen activas, es decir que son vulnerables al cambio de energía del cauce de acuerdo a la época climática, o sea que, si aumenta repentinamente el cauce fluvial por las temporadas de lluvias, se va ver afectado el tamaño y posición de los depósitos, o en su defecto serán removidos completamente, por lo que es importante realizar análisis multitemporales para hacerle seguimiento a los depósitos en diferentes épocas climáticas.

Por último, es de resaltar que las aguas del río California presentan una tonalidad marrón claro por la cantidad de partículas en suspensión que transporta, se asume que esto es causado por

la procedencia de las aguas y las actividades de minería que ocurren en la parte alta de la cuenca, además que en ocasiones el agua toma tonalidades más oscuras a modo de manchones, que ocurre cuando las minas hacen descargas de material de sus tanques de concentración según explica unos de los barequeros.

8.2 Observaciones del levantamiento fotogramétrico

La obtención de la nube de puntos densa en el software Agisoft, y los productos derivados de esta, presentaron alteraciones debido a que el software realizó interpretaciones inadecuadas de la información de las imágenes, evidenciándose esto en puntos con excesivo brillo de la imagen en algunos sitios en respuesta al reflejo de la luz en la superficie del agua. Infortunadamente, este tipo de anomalías no se pudieron corregir editando las imágenes adquiridas ya que el formato JPG, al ser un formato comprimido, carece de la suficiente información que permita realizar las modificaciones pertinentes.

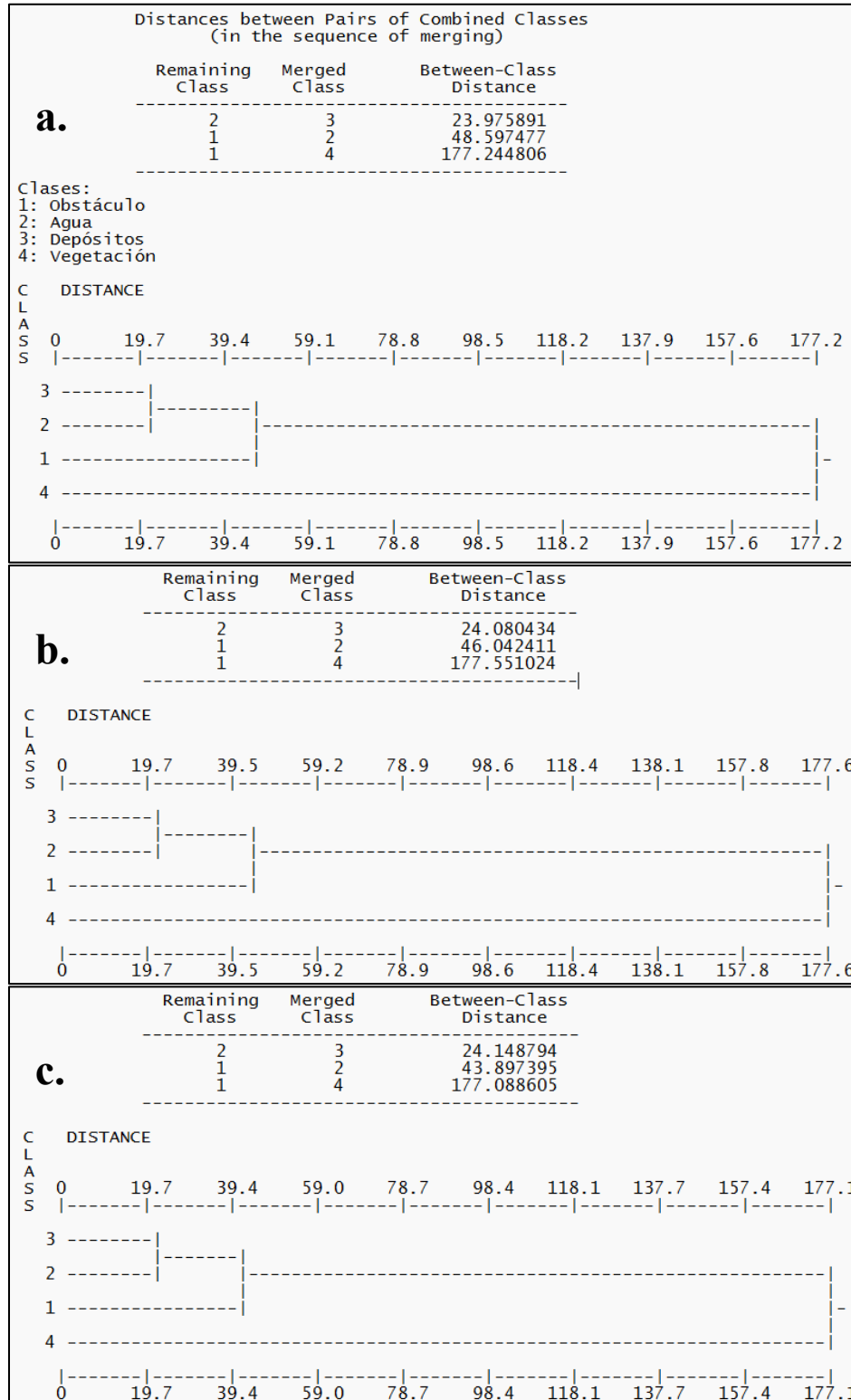
Del mismo modo, la clasificación automatizada de la nube de puntos que tenía como fin discriminar todo lo no correspondiente a la topografía del terreno y del cauce demostró ser muy imprecisa, catalogando de forma errónea muchos de estos puntos. Por esto, fue necesario realizar una clasificación manual, diferenciando los puntos correspondientes a terreno de los demás (vegetación alta y baja, edificaciones, etc) para la construcción del DTM.

8.3 Observaciones del procesamiento en GIS

Se presentaron algunas limitaciones al realizar la clasificación supervisada, como se mencionó, las firmas de las clases se pueden analizar a través de un dendograma (Figura 50), donde se evalúa la independencia entre clases según la distancia que haya entre ellas.

Figura 50.

Dendograma de las firmas generadas: a) sobre el ortomosaico, b) ortomosaico y pendiente DTM, c) ortomosaico y pendiente DSM.



Como se puede apreciar, la única clase con mayor diferenciación es la “*Vegetación*”, las demás clases toman valores de píxel muy similares, por ejemplo, en condiciones normales se esperaría que la firma de la clase “*Agua*” fuera más diferenciable de las demás clases, es decir que la categorización de sus píxeles tuviera mayor precisión, sin embargo, como se mencionó anteriormente, el agua del río California muestra tonalidades ocre por la carga de sedimentos en suspensión, por lo que los valores de píxel se asemejan con los de los depósitos de barras y con algunos obstáculos que son rocas de tonalidades similares, por lo que aumenta el error al usar la herramienta de clasificación.

El raster de salida (Figura 37) presenta inconsistencias debidas a las causas expresadas anteriormente y a la resolución del ortomosaico, esto último ocasiona que al vectorizar la capa raster se generen demasiados polígonos pequeños de clases mal asignadas que a pesar de corregir generalizando la capa no se logran muy buenos resultados. Para dar solución a esto, se probó adicionando una banda ráster a la generación de la firma para evaluar si mejoraba la diferenciación entre clases, esta banda adicional corresponde al raster de pendientes tanto del DTM, como del DSM, pero las firmas no presentan mejoría con respecto a la generadas inicialmente (Figura 50 b y c). No obstante, en la medida que se encuentre solución a los inconvenientes visualizados en esta práctica, la clasificación supervisada constituye una herramienta viable para optimizar los procesos de selección de algunos de los criterios.

8.4 Observaciones del análisis multicriterio

El análisis multicriterio es una herramienta determinante para la toma de decisiones debido a que señala las zonas de mayor relevancia en base al cruce de la información disponible, es decir que son los tramos iniciales a comprobar en campo con ayuda de los barequeros, con el fin de validar su potencialidad, o en su defecto establecer la independencia de los criterios en el cruce de

información. Esto último, debido a que se pudo notar que algunos criterios a los que se les asigna el máximo valor de relevancia, pierden importancia cuando se ponderan con aquellas zonas de menor favorabilidad contenidas en los demás criterios.

Los pesos asignados a las variables son relativos dado que no hay documentación al respecto, por esto, el proceso se repitió varias veces probando con distintos porcentajes, buscando los resultados más coherentes con las visualizaciones de campo y el levantamiento fotogramétrico, finalmente se determina que el mejor producto del análisis multicriterio corresponde al realizado con los porcentajes de la Tabla 8a y la Figura 49a. Por otro lado, es importante que la resolución de todos los raster de entrada sea similar para que el mapa resultante tenga una concordancia de escala y su visualización sea correcta.

8.5 Observaciones de la comprobación en campo

La fase de comprobación estuvo condicionada en primera instancia por la temporada climática, ya que el nivel del río California estaba elevado y algunas de las zonas se encontraban sumergidas por lo que fue necesario reubicar algunos puntos de muestreo. Por otro lado, la evaluación se realizó con un cateo superficial y las mediciones fueron basadas netamente en la experiencia de los barequeros. A pesar de lo anterior, se pudo apreciar que hay frentes de trabajo ampliamente explotados por los barequeros que coinciden con zonas clasificadas con buena favorabilidad en el análisis multicriterio.

9 Conclusiones

- Adicional a la teoría sobre la dinámica fluvial establecida en el marco teórico, se lograron establecer otros factores que influyen en la formación de depósitos aluviales, como son aquellas zonas de adelgazamiento y ensanchamiento del cauce acompañado por un cambio en la pendiente, la cual ocasiona una disminución en la energía del drenaje y forma barras laterales en los tramos más anchos.
- La estrategia de trabajo para la aplicación de la fotogrametría, el uso de algoritmos GIS y el posterior análisis multicriterio produjo una metodología ágil y fluida, optimizando el tiempo y el esfuerzo requeridos para su desarrollo.
- Aunque la marcha metodológica llevada a cabo en el presente proyecto es fácilmente replicable, hay que tener en cuenta que los factores que influyen en la sedimentación del cauce pueden variar de zona a zona.
- En la dinámica fluvial intervienen muchos factores, los considerados en el presente ejercicio pueden variar según la zona, o entrar en juego otras variables interesantes como la litología y la configuración estructural, factores modificadores en la sedimentación de material, por lo que la determinación de los criterios más influyentes de alguna zona depende directamente de profesionales capacitados.
- Es importante considerar que las condiciones del afluente y de sus depósitos son dinámicos, por lo cual sus atributos son variables en tiempos relativamente cortos, dependiendo de factores como la temporada climática, crecientes, movimientos en masa, actividad antrópica, entre otros. Por esto, el producto final (mapa) puede perder vigencia rápidamente y verse alterada su representación estimada.

- La relación entre los valores de favorabilidad obtenidos en el mapa y las valoraciones de campo es congruente, siendo discordante sólo en ciertos puntos específicos, lo que refleja que la metodología es funcional, pero requiere ajustes en sus parámetros.

10 Recomendaciones

- Con el fin de optimizar la identificación y clasificación de obstáculos y depósitos asociados se recomienda trabajar y profundizar en algoritmos que perfeccionen la clasificación supervisada sobre productos del dron elaborados a partir de imágenes RGB. De igual manera, se sugiere el uso de sensores capaces de recolectar mayor información y de mejor calidad, como sensores multiespectrales o LIDAR, con lo que sería posible realizar una clasificación automatizada más eficiente.
- La visualización de los depósitos que se encuentran sumergidos dentro del cauce asociados a pocetas, obstáculos u otras trampas no fue posible mediante el levantamiento fotogramétrico por las limitaciones del sensor. Se recomienda un análisis multitemporal específicamente para época de sequía donde se podrían evaluar estos factores en las zonas profundas de los cauces.
- La aplicación de métodos geofísicos (geoeléctrica y magnetometría) pueden complementar la metodología actual, permitiendo obtener información adicional para la categorización de los depósitos aluviales respecto a su concentración mineral.
- Se sugiere utilizar parámetros cuantitativos para evaluar las zonas en la etapa de comprobación de resultados en campo, realizando una medición de las cantidades presentes de oro. Asimismo, es importante que el tiempo entre el levantamiento fotogramétrico,

geomorfológico y la comprobación de resultados sea el menor posible, con el fin de evitar modificaciones ligadas a la alta dinamicidad de los afluentes y sus depósitos.

- Se considera relevante que el proceso de socialización de los productos obtenidos sea llevado a cabo no solo por geólogos y/o profesionales con conocimientos técnicos del tema, sino también, por trabajadores sociales y profesionales que tengan un enfoque comunitario y sepan transmitir adecuadamente el contenido del proyecto a la gran variedad humana dentro de las comunidades.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional de Minería. (2020). *ABECÉ, GÉNESIS Registro de Minería de Subsistencia*.
Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/abece_genesis-registro_mineria_de_subsistencia-v.1.pdf
- Agencia Nacional de Minería. (27 de Diciembre de 2021). *Listados de Producción Mineros de Subsistencia*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/?q=Barequeros&field_tipo_publicacion_value=0
- Amaya, S., Zuluaga, C. A., & Bernet, M. (2017). Newfission-track age constraints on the exhumation of the central Santander Massif: Implications for the tectonic evolution of the NorthernAndes, Colombia. *Lithos*, 388-402.
- Anders, V., & al, e. (5 de Enero de 2022). *Etimología de ARTESANO*. Obtenido de Etimologías de Chile: <http://etimologias.dechile.net/?artesan>
- Arcos Alosno, A., & Rivera Guzmán, E. (2018). *Brechas de género en la minería: La minería artesanal y de pequeña escala colombianadesde una perspectiva de género*. Envigado(Antioquia): Alianza por la Minería Responsable.
- Autel Robotics. (2020). *User Manual for EVO II series*.
- Bermúdez Rico, R. E., Rodríguez Maldonado, T., & Roa Avendaño, T. (2011). *Mujer y Minería. Ámbitos de análisis e impactos de la minería en la vida de las mujeres, Enfoque de derechos y perspectiva de género*. Bogotá.
- Cajal, A. (20 de Mayo de 2019). *Sectores Económicos de Colombia: Primario, Secundario, Terciario*. Obtenido de Lifeder: <https://www.lifeder.com/sectores-economicos-colombia/>
- Cheli, A. (2011). *Introducción a la fotogrametría y su evolución*. La Plata: Hespérides.
- Cuartero Saéz, A. (2003). *Fotogrametría Digital*. Extremadura: CIREN.

- Custers, B. (2016). *The Future of Drone Use - Opportunities and Threats from Ethical and Legal Perspectives*. Leiden: Springer.
- Dering, G. M., Micklethwaite, S., Thiele, S. T., Vollgger, S. A., & Cruden, A. R. (2019). Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of dykes: Best practises and future potential. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148-166.
- Elkhrachy, I. (2021). Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. *Alexandria Engineering Journal*, Volúmen 60, 5579-5590.
- Griffith, S. V. (1960). *Alluvial prospecting and mining*. Oxford: Pergamon Press.
- Harrald, J. E., Coe, A. L., Thomas, R. M., & Hoggett, M. (2021). Use of drones to analyse sedimentary successions exposed in the foreshore. *Elsevier*, 253-268.
- INGEMMET. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo. (2021). *Evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa en los sectores Huancaluque, Llamani y cerro Ccatasuyo. Distrito de Sandia, provincia de Sandia, región Puno*. Lima.
- INGEOMINAS. (1977). *Geología de la Plancha 110 Pamplona*. Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.). *UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DEL TERRITORIO COLOMBIANO*. Santa Fé de Bogotá D.C.
- Jaimes Bermúdez, J. P. (2020). *Petrología de las rocas metabásicas y básicas, asociadas a la unidad Esquistos del Chicamocha, aflorantes en la franja Pescadero-Aratoca, Sector SW del Macizo de Santander*. Bucaramanga.
- Lara Rodriguez, J., Tosi Furtado, A., & Altimiras Martin, A. (2020). Minería del platino y el oro en chocó: pobreza, riqueza natural e informalidad. *Revista de Economía Institucional*, 241-268.

López, J. H. (24 de Junio de 2020). *Zaragoza del Nechí en el País del Oro*. Obtenido de El Mundo:

<https://www.elmundo.com/noticia/Zaragoza-del-Nechi-en-el-Pais-del-Oro/380366>

Lozano, Q. H., & Pulido, U. O. (1986). Situación actual del oro y la plata en Colombia. Geología, génesis, aspectos mineros, reservas y producción. *Boletín Geológico Volumen 27- No. 3*, 1-56.

Macdonald, E. H. (2007). *Handbook of gold exploration and evaluation*. Washington D.C: WOODHEAD PUBLISHING.

Mantilla Figueroa, L. C., Bissig, T., Valencia, V., & Hart, C. J. (2013). The magmatic history of the Vetas-California mining district, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 235-249.

Mantilla Figueroa, L. C., Mendoza F., H., Bissig, T., & Hart, C. (2011). Nuevas evidencias sobre el magmatismo Miocénico en el Distrito minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*.

Mejía Méndez, L. Y., Fajardo Gómez, N., & Valencia, J. A. (2017). *Zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa, escala 1:10.000 para el municipio de Suratá, Santander, aplicando métodos estadísticos multivariados*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Ministerio de Minas y Energía. (2003). *Glosario técnico minero*. Bogotá.

Ministerio de Minas y Energía. (2017). *INSTRUCTIVO PARA LA INSCRIPCIÓN DE MINEROS DE SUBSISTENCIA ¡UN PRIMER PASO HACIA LA FORMALIDAD!* Bogotá. Obtenido de <https://siminero.minminas.gov.co/SIMINERO/ayuda/InstructivoMinerosdeSubsistencia.pdf>

- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Explotación de oro de aluvión, evidencias a partir de percepción remota 2020 (EVOA)*.
- Montero, I., & Rovira, S. (1991). El Oro y sus aleaciones en la orfebrería Prerromana. *Archivo Español de Arqueología* 64, 7-21.
- Over, J., Ritchie, A., Kranenburg, C., Brown, J., Buscombe, D., Noble, T., . . . Warrick, J. (2021). *Processing coastal imagery with Agisoft Metashape Professional Edition, version 1.6 - Structure from motion workflow documentation*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1039, 46 p., doi:<https://doi.org/10.3133/ofr1039>
- Philips, G., & Powell, R. (2015). Hydrothermal alteration in the Witwatersrand goldfields. *Ore Geology Reviews*, 245-273.
- PNUMA, & MADS. (2012). *Sinópsis Nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala*. Bogotá.
- Real Academia Española. (2021). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de <https://dle.rae.es/artesano#1fTfd6z>
- Robb, L. (2005). *Introduction to Ore-Forming Processes*. Malden: Blackwell Publishing.
- Rojas Barbosa, S. (2013). *Metalogenia de las mineralizaciones auríferas en la zona de Vetas, Santander*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Royero, G. J., & Clavijo, J. (2001). *Mapa Geológico Generalizado, Departamento de Santander, Escala 1:400000, Memoria Explicativa*. INGEOMINAS.
- Rubiano, M. J., Vélez, M. A., & Rueda, X. (2020). *Minería de oro artesanal y de pequeña escala. Estrategias para su formalización y diferenciación de la minería ilegal*. Facultad de Economía, Universidad de los Andes Colombia; Centro de Estudios sobre Seguridad y Drogas (CESED) y Environment for Development (EfD).

- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Anexo A: Glosario de términos geomorfológicos*. Bogotá.
- Smirnov, V. I. (1982). *Geología de yacimientos minerales*. Moscú: MIR MOSCÚ.
- Toscano, M., Pérez-López, R., & Sáez, R. (2012). Concentración de minerales pesados mediante técnicas de batea y su interpretación. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 164-172.
- Velandia, F., García Delgado, H., Zuluaga, C. A., López, J. A., Bermúdez, M. A., & Audemard M., F. A. (2020). Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes. *Journal of Structural Geology*.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz, J. B., & Restrepo, H. A. (1973). Mapa Geológico De Colombia, Cuadrángulo H-12 Bucaramanga, Cuadrángulo H-13 Pamplona, Escala 1:100.000, Memoria Explicativa. *Boletín Geológico*, Volúmen XXI.
- Wells, J. H. (1989). *Placer Examination: Principles and Practice*. Errata.