

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Postgrados

**Adquisición Modelo de Superficie Digital DSM de alta resolución
de bajo costo:
Caso de estudio geología Estructural Cien Pesos Marmato**

JUAN CARLOS ORTIZ MUÑOZ

Tesis de grado presentado como requisito
para la obtención del título de
Maestría en Sistemas de Información Geográfica

Quito, Enero de 2012

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Postgrados

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Adquisición Modelo de Superficie Digital DSM de alta resolución
de bajo costo:**

Caso de estudio geología Estructural Cien Pesos Marmato

JUAN CARLOS ORTIZ MUÑOZ

Richard Resl, PhD(c)

Director de Tesis

.....

Stella de la Torre, PhD

Decana de Colegio de Ciencias Biológicas
y Ambientales

.....

Víctor Viteri, PhDNombre

Decano del Colegio de Postgrados

.....

Pablo Cabrera, MScNombre

Profesor de Maestría UNIGIS

.....

Quito, Agosto de 2012

© Derechos de autor

Juan Carlos Ortiz Muñoz

2012

RESUMEN

Existen tecnologías costosas para análisis espacial SIG (*Sistemas de Información Geográfica*) 3D de alta resolución mediante la generación de nube de puntos, estos son muy importantes aplicados en el área de geología estructural para identificar zonas de interés económico para la explotación mineral. En este trabajo se implemento el desarrollo de nuevas técnicas de bajo costo y fácil uso comparando los resultados de software libre con el software licenciado.

En este trabajo se describe la captura de fotografías aéreas mediante un sistema *Unmanned Aerial Vehicle* UAV (Plataforma Globos de Helio) equipado con una cámara digital semireflex mediante el procesamiento de las imágenes se reconstruye la geometría tridimensional de la escena (nube de puntos) la cual es georeferenciada mediante puntos de control en tierra levantados con estación total para generar un *Modelo Digital de Superficie* DSM con un Raster de precisión < 20 cm y ortofotos de gran detalle.

Con el procesamiento de los datos el software licenciado tiene la ventaja de tener todos los paquetes para el procesamiento de las imágenes y obtención de un forma rápida el modelo DSM a diferencia del software libre que se deben buscar diferentes aplicativos para el proceso de calibración de la cámara y la orientación de imágenes para la generación de nubes puntos y exportación de modelo para el análisis geológico de superficie.

Comparando los DSM obtenidos con los tipos de software en términos de precisión, se encontró que el DSM generado con el software libre tiene una mejor resolución espacial en el plano horizontal (plano x,y) en comparación con el software legal, mientras que el software licenciado proporciona una mejor resolución espacial en la elevación (plano z) en comparación con los valores levantados con estación total.

Con el apoyo de muestreo de superficie y análisis espacial SIG de superficie Raster (pendientes, sombras, curvatura, geología) y álgebra de mapas se obtienen las zonas de interés mineral asociados al análisis geológico estructural.

Palabras Claves: aerofotografías, bajo costo, calibración, cámara, DSM, estructural, geología, nube puntos, ortofotos, precisión, raster, software libre, UAV, 3D.

ABSTRACT

Technologies for 3D GIS spatial analysis for generation of a point cloud are expensive. These are important when applied to identify areas of economic interest for mineral exploitation. In this paper were implemented new technics based on public domain software comparing the results with a licensed (commercial) software.

I was used unmanned aerial Vehicle UAV (Helium Balloon Platform) to capture the aerial photos and a digital camera semi-reflex. Total station ground control points were use to generate the three-dimensional geometry of the scene (point cloud) with a raster Digital Surface Model DSM accuracy <20 cm and orthophotos of highly detailed.

The commercial software has the advantage of having all packages for image processing and it's easier to get a model. By the other hand, for public domain software downloading different applications its required to calibrate and locate the camera for the generation of point cloud and exportation of the model for the geological analysis of surface.

The assesment of the accuracy of the models was compared and it was found that the software of public domain have a better spacial resolution in the horizontal (xy plane) while the commercial software gives a better special resolution in the elevation (z plane) comparing with the results obtained in the total station.

Mineral interest areas associated with structural geological analysis are generated by sampling and doing the GIS spacial analyst for the raster surface (slopes, shadows, curvature, geology).

Keywords: aerial photography, low cost, calibration, camera, DSM, structural geology, cloud points, orthophotos, accuracy, raster, public domain software, UAV 3D.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivo Especifico.....	2
2. MATERIALES Y MÉTODOS	4
2.1. Localización zona de estudio	5
2.2. Plataforma y Sensor.....	6
2.2.1. Plataforma Globos de Helio.....	6
2.3. Cámara	7
2.3.1. Altura Vuelo error cámara	8
2.3.2. Calibración Cámara.....	10
2.4. Puntos de Control en Tierra PCT	11
2.5. Mosaico de imágenes y procesamiento	12
2.5.1. Software Licenciado PhotoScan.....	12
2.5.2. Software Libre Insight3d y JAD3D.....	15
3. RESULTADOS	18
3.1. Modelo Raster	19

3.1.1. Modelo 3D Red Triangular TIN.....	21
3.1.2. Orientación de pendientes Aspecto.....	23
3.1.3. Mapa de Pendientes	25
3.1.4. Mapa de Sombras (Hillshade).....	26
3.1.5. Forma de la pendiente (Curvatura)	27
3.1. Ortofoto	28
3.2. 3D Visualización.....	29
3.1. Geología Estructural	30
3.2. Comparación Licenciado vs Libre	31
4. IMPLEMENTACIÓN (CASO DE ESTUDIO GEOLOGÍA ESTRUCTURAL CIEN PESOS - MARMATO)	36
4.1. Muestreo de Superficie	36
4.2. Geología Unidades Superficiales	39
4.3. Análisis e Integración de la Información.....	40
4.3.1. Capas temáticas.....	41
4.3.1.1. Geología	41
4.3.1.2. Aspecto	42
4.3.1.3. Pendiente.....	44
4.3.1.4. Sombras (Hillshade)	46
4.3.1.5. Forma de la pendiente (Curvatura)	47
4.3.2. Algebra de mapas	49
5. CONCLUSIONES	50

6. RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación Plataformas UAV.	6
Tabla 2. Altura Vuelo Precisión Cámara.	10
Tabla 3. Puntos de Control PCT levantados con Estación Total Trimble S6 DR PLUS.	12
Tabla 4. Ajuste Error Modelo PhotoScan.	15
Tabla 5. Valores de Altura extraídos de Estación Total, Raster software libre Inshgt, Software licenciado Agisoft PhotoScan.	33
Tabla 6. Relación de Muestras con descripción geológica y estructural.	38
Tabla 7. Unidades Geológicas y reclasificación.	42
Tabla 8. Aspecto – Orientación de la Pendiente reclasificación.	43
Tabla 9. % de la Pendiente reclasificación.	45
Tabla 10. Sombras (Hillshade) reclasificación.	46
Tabla 11. Forma de la pendiente (Curvatura) reclasificación.	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Enfoque Metodológico.	4
Figura 2. Localización Zona de Estudio Cien Pesos-Marmato.	5
Figura 3. Plataforma Globo Helio – Picavet.	7
Figura 4. Cámara y Accesorios Ricoh GR III.	8
Figura 5. Cálculo Altura Vuelo Error Cámara.	9
Figura 6. Parámetros de calibración (Agisoft, Lens: Calibration Camera Software, 2012b).	11
Figura 7. Marcadores Puntos de Control PCT.	12
Figura 8. Procesamiento en PhotoScan (Carga de Fotografías- Calibración- Generación de Puntos-Orientación Fotos-Generación Textura.	13
Figura 9. PCT y Asignación Sistemas de Coordenadas Modelo Tridimensional PhotoScan.	14

Figura 10. Procesamiento en Insght3d (Carga de Fotografías- Calibración- Generación de Puntos-Orientación Fotos).....	16
Figura 11. Archivos *.txt Fuente (nube puntos) y destino para transformación de Coordenadas.....	17
Figura 12. Transformación de Coordenadas Java Graticule 3D JA3D.....	18
Figura 13. Modelo Raster DSM software licenciado Agisoft.....	20
Figura 14. Modelo Raster DSM software libre Insight.	21
Figura 15. Modelo 3D Red Triangular TIN software licenciado Agisoft.	22
Figura 16. Modelo 3D Red Triangular TIN software libre Insight.	23
Figura 17. Modelo de Superficie Mapa Aspecto - Orientación de la Pendiente.	24
Figura 18. Modelo de Superficie Mapa % Pendiente.....	26
Figura 19. Modelo de Superficie Mapa de Sombras (Hillshade).	27
Figura 20. Modelo de Superficie Mapa de Curvatura.	27
Figura 21. Ortofoto Alta resolución Agisoft PhotoScan.....	29
Figura 22. Escenas 3D alta definición.	30
Figura 23. Comparación Software licenciado vs Libre.....	32
Figura 24. Matriz de Correlación valores de altura Estación Total, Raster software libre Insght, Software licenciado Agisoft PhotoScan.....	33
Figura 25. Algebre de mapas (Diferencia Raster software licenciado Agisoft – Raster software libre Agisoft).	35
Figura 26. Mapa Localización Muestreo Superficie.	37
Figura 27. Representación Diferente estructuras observadas en el muestreo de Superficie.	39
Figura 28. Mapa Geológico Unidades Superficiales.....	40
Figura 29. Mapa reclasificado Unidades Geológicas.....	42
Figura 30. Mapa reclasificación Aspecto – Orientación de la Pendiente.	44
Figura 31. Mapa reclasificación % de la Pendiente.	45
Figura 32. Mapa reclasificación de Sombras (Hillshade).....	47
Figura 33. Mapa reclasificación de Curvatura.	49

Figura 34. Mapa de zonas de interés mineral análisis de superficie y geología estructural Cien Pesos Marmato- Colombia.....50

1. INTRODUCCIÓN

Las fotos aéreas mediante plataforma UAV (vehículo aéreo no tripulado del inglés *Unmanned Aerial Vehicle*), son una nueva herramienta para realizar fotogrametría, las cuales ofrecen un bajo costo al compararlas con las obtenidas de forma clásica en vuelos tripulados, además de permitir el análisis a pequeña escala (Eisenbeiß, 2009). Las fotografías aéreas son una base fundamental en el campo SIG (Sistemas de Información Geográfica), porque capturan una parte de la superficie en un momento dado y permiten realizar un análisis espacial 3D de alta resolución con nuevas técnicas de software especializado para el procesamiento de aerofotografías, mediante ortorectificación. Estas técnicas se han implementado en áreas como arqueología arquitectura, desastres naturales, hidrogeología, ordenamiento territorial, geología, ambiental, forestal y agricultura, utilizando software licenciado como (Agisoft, PhotoScan, 2012a) y (Photomodeler) entre otros (Alias, Zulkepli, & Setan, 2010; Fux, 2006; Karauğuz, Çorumluoğlu, Kalaycı, & Asri, 2009; Mora & Céspedes, 2010; Verhoeven, 2011 y Gischig, 2011) o software libre como Insight de (Mach, Open Source image based 3D modelling software, 2012) y MeshLab de (University of Pisa, 2011) (Dowling, 2009; Markaeology, 2010 y Binarymillenium, 2008).

Para este estudio, se utilizó una plataforma UAV de globos de helio con una cámara digital semireflex no calibrada luego se realizó el procesamiento de las fotografías aereas utilizando software licenciado (Agisoft, PhotoScan, 2012a) y el software libre Insight de (Mach, Open Source image based 3D modelling software, 2012) para la generación de una nube de puntos con coordenadas espaciales (x,y,z) que son exportados para representar un DSM (Modelo de Superficie Digital) en formato Raster donde es necesario la obtención de puntos control en tierra PCT con estación total ubicar el modelo DSM en un sistema de coordenadas reales georeferenciados. Mediante el software licenciado se genera un mosaico de imágenes con las fotografías aereas ortorectificadas con un tamaño de pixel $\approx 4\text{mm}$ exportadas en un sistema de

referencia local WGS 84/UTM Zona 18N permitiendo realizar medidas de distancia y ángulos con alta precisión.

Por ultimo se realiza un análisis de superficie SIG integrado con la información geológica estructural levantada en campo para la identificación de áreas de interés mineral mediante el análisis de pendiente, sombras, orientación de la pendiente, curvatura, geología y estructuras que luego con un algebra de mapas se caracterizan los diferentes procesos geológicos estructurales asociados a zonas de interés mineral a una resolución espacial < 20 cm.

La principal motivación es destacar que el método de adquisición de DSM de alta precisión mediante software licenciado y libre de modelos 3D y plataformas UAV de bajo costo puede suministrar resultados inclusive mejores que las aplicaciones comerciales (LIDAR o imágenes de satélite IKONO) con información muy actualizada.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Obtención de modelos de superficie digital DSM de alta precisión para la determinación de zonas de interés mineral asociadas a estructuras geológicas en Cien Pesos Marmato mediante software libre o licenciado y UAV de bajo costo.

1.1.2. Objetivo Especifico

- Describir los pasos para crear DSM a partir de la adquisición de las fotografías aéreas
- Investigar el potencial de software libre para la obtención de modelos de elevación de alta resolución rentables.
- Evaluar los métodos con software libre y licenciado para ver los beneficios de estos.

- Apoyarse con aplicaciones de software libre para el procesamiento de la información.
- Utilizar análisis espacial SIG y algebra de mapas para determinar las zonas de interés mineral asociados al análisis geológico estructural

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las técnicas de fotografías aéreas han aumentado considerablemente en los últimos años gracias al desarrollo tecnológico de cámaras digitales y avances en software licenciado y libre la figura 1 muestra el proceso metodológico con los resultados esperados aplicado al caso de estudio determinación de zonas de interés mineral geología estructural Cien Pesos Marmato.

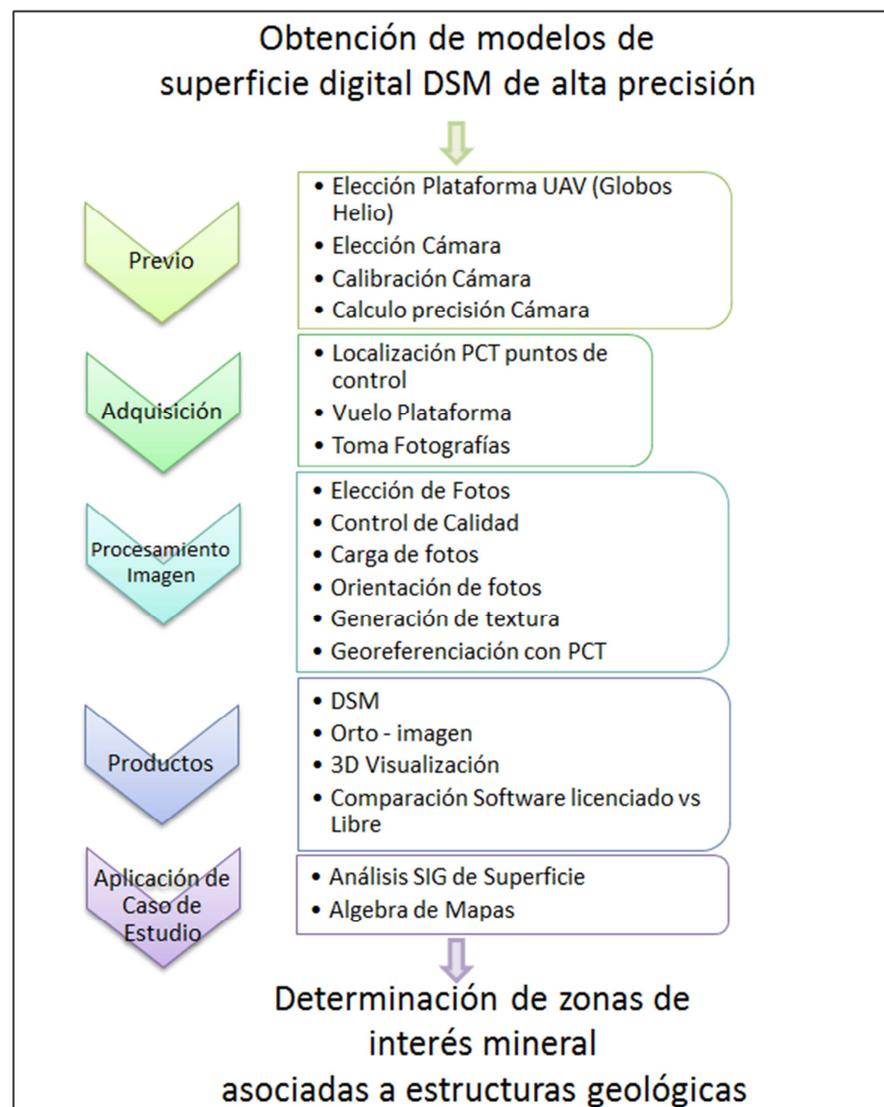


Figura 1. Enfoque Metodológico.

2.1. Localización zona de estudio

Cien Pesos la zona de estudio se localiza en el municipio de Marmato tiene un área de 0.8 ha y esta situado en el Cauca Medio al este de la Cordillera Occidental que está separado por el Rio Cauca al oeste de la Cordillera Central. Se encuentra a 120 km al sur de Medellín en el departamento de Caldas - Colombia ver figura 2.

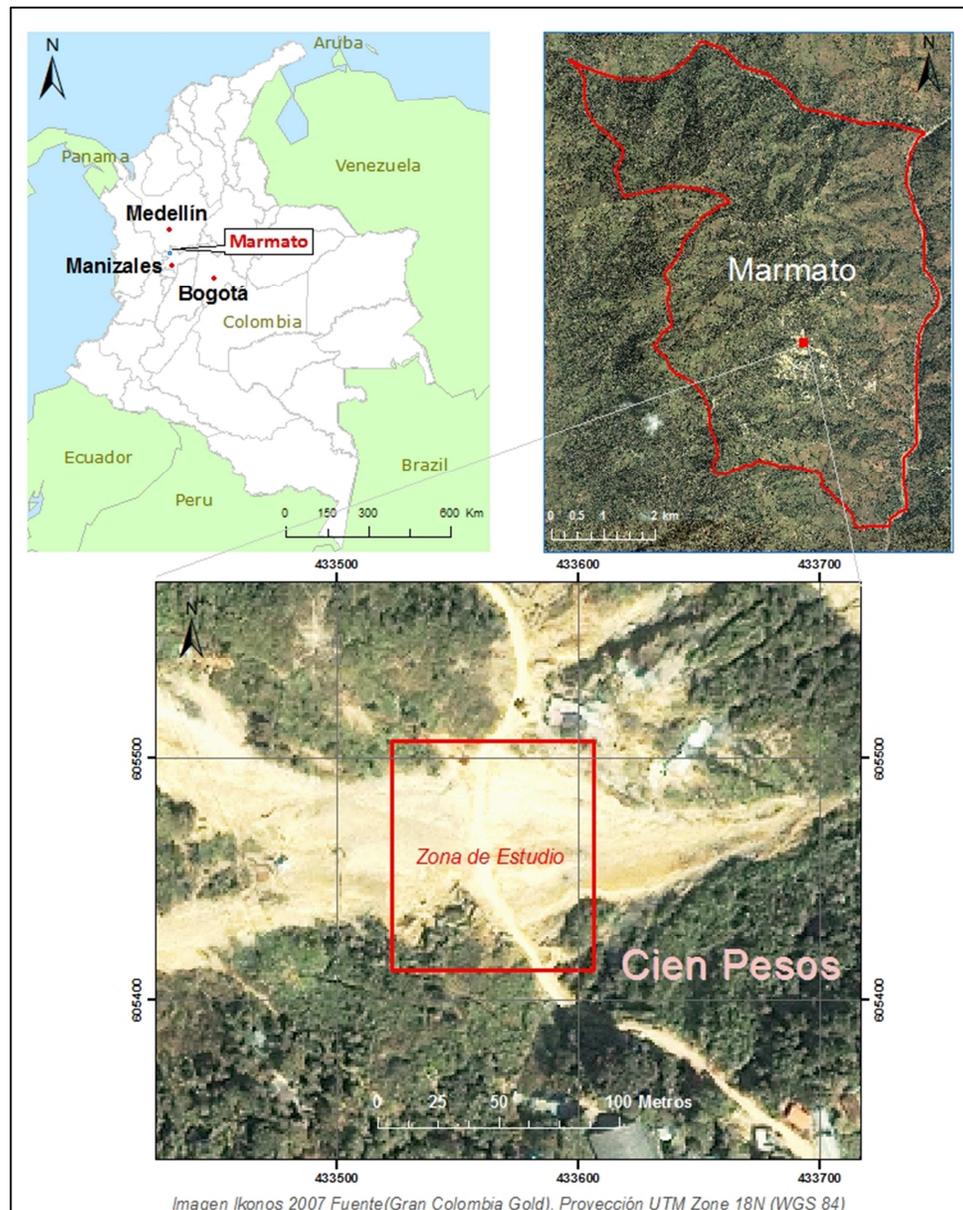


Figura 2. Localización Zona de Estudio Cien Pesos-Marmato.

2.2. Plataforma y Sensor

Se utiliza una plataforma UAV que es un vehículo aéreo sin tripulación humana a bordo y son utilizados para la toma de fotografía aérea; existen varias plataformas para la captura de imágenes (Globos, Cometas y Aviones- Helicópteros a radio control) (James S. Aber, 2010) realiza una comparación de estas que se resumen en la tabla 1 que muestra ventajas y desventajas en función del costo

Plataforma	Costo US Dolar	Personal Operarios	Fuente Energía	Altura de Vuelo	Carga Útil	Tiempo de Vuelo
Cometas	700-500	1-2	Aire	300+m	<1-3 kg	Variable
Globo Aire Caliente	1000-10.000	2	Propano	300+m	5-10 kg	>20 min
Globo Helio	700-20.000	4+	Helio	300+m	5-10 kg	>20 min
Avión	10.000-60.000	1-2	Batería	1000m	≤2 kg	10-20 min
Helicóptero	2.000-50.000	1-2	Batería	300+m	≤2 kg	12 min

Tabla 1. Comparación Plataformas UAV tomado de (James S. Aber, 2010).

2.2.1. Plataforma Globos de Helio

Con el fin de disminuir los costos se eligió el globo de helio sujeto a una cuerda fija en tierra con una cámara que se monto en una caja sencilla en un sistema llamado Picavet (Hunt, 2002) ver figura 3.

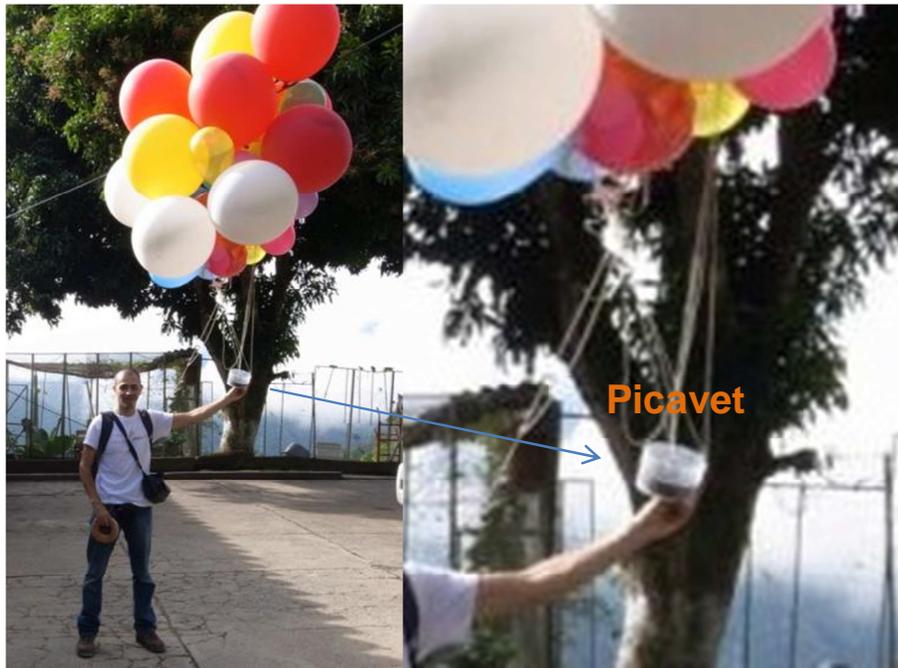


Figura 3. Plataforma Globo Helio – Picavet.

2.3. Cámara

Se utilizó la cámara réflex Ricoh GR Digital III de 10 Megapíxeles con sensor de imagen CCD de 1/1.7 pulgadas (número total de píxeles: aprox. 10.40 millones de píxeles) con distancia focal $f=6.0\text{mm}$ (equivalente a 28 mm en cámaras de películas de 35mm) con un objetivo de conversión de gran angular GW-2 de 0.75 aumentos con un peso de cámara con baterías aproximado de 200 g esta cámara ha mostrado muy buenos resultados en (Hakala, 2010) y (Bendea, Chiabrandó, Tonolo, & Marenchino, 2008). Se recomiendan los siguientes parámetros para la configuración de la cámara:

Mode **S** (*Prioridad de obturación*)

Resolución tamaño imagen: **F3648 (10M)**

Enfoque: **Snap**

Distancia de enfoque: ∞

Medición Exposición: **Multi**

Ajuste de la imagen: **Estandar**

Intervalo de Disparo: **Configurar cada 5 segundos**

Ajuste ISO: **ISO 100**

F: **Se deja la apertura automática para que la cámara ajuste la apertura para una exposición óptima.**

Velocidad obturación **1/250**



Figura 4. Camara y Accesorios Ricoh GR III.

2.3.1. Altura Vuelo error cámara

La altura de vuelo de la plataforma UAV va a determinar la precisión de las fotografías aéreas entre mas alejado mas pixelado menos resolución de la imagen (Ilsley, Kite and Balloon Aerial Imaging, 2011) muestra de un forma sencilla para una altura determinada el calculo del ancho, largo y pixel resolución en x,y de la imagen con la utilización de dos cintas metricas: una para medir $L_{CintaEnImagen}$ que corresponde al tramo de longitud de la cinta metrica que aparece en la fotografía y la otra cinta metrica es para medir la distancia de la camara a la cinta metrica que se tomo la fotografía $D_{CamaraCinta}$ ver figura 5.



Figura 5. Calculo Altura Vuelo Error Cámara.

Con el parametro p y el tamaño de imagen para la camara RICOH (3648 x2432 pixeles) se puede calcular el ancho y largo de una fotografía para una altura ademas de la resolución del pixel para x,y en metros:

$$p = \frac{L_{CintaEnImagen}}{D_{CamaraCinta}} = \frac{1.682}{1.374} = 1.22416303 \text{ m}$$

$$AnchoImagen = AlturaCamara \times p$$

$$X_{Ancho} = 3648 \text{ pixel}$$

$$Y_{Alto} = 2432 \text{ pixel}$$

$$P = \frac{Y_{Alto}}{X_{Ancho}} = 0.6666667$$

$$AltoImagen = P \times AnchoImagen$$

$$PixelResolución X = \frac{AnchoImagen}{X_{Ancho}}$$

$$\text{Pixel Resolución } Y = \frac{\text{Ancho Imagen}}{Y_{\text{Alto}}}$$

Altura Cámara (m)	Ancho Imagen (m)	Alto Imagen (m)	Pixel Resolución X (m)	Pixel Resolución Y (m)
10	12.242	8.161	0.003	0.005
20	24.483	16.322	0.007	0.010
30	36.725	24.483	0.010	0.015
40	48.967	32.644	0.013	0.020
50	61.208	40.805	0.017	0.025
60	73.450	48.967	0.020	0.030
70	85.691	57.128	0.023	0.035
80	97.933	65.289	0.027	0.040
90	110.175	73.450	0.030	0.045
100	122.416	81.611	0.034	0.050
110	134.658	89.772	0.037	0.055
120	146.900	97.933	0.040	0.060
130	159.141	106.094	0.044	0.065
140	171.383	114.255	0.047	0.070
150	183.624	122.416	0.050	0.076
160	195.866	130.577	0.054	0.081
170	208.108	138.738	0.057	0.086
180	220.349	146.900	0.060	0.091
190	232.591	155.061	0.064	0.096
200	244.833	163.222	0.067	0.101

Tabla 2. Altura Vuelo Precisión Cámara.

2.3.2. Calibración Cámara

Existe una gran diferencia entre las cámaras tradicionales de fotogrametría aérea y las cámaras digitales normales las primeras tienen calculados los parámetros de calibración desde el fabricante y las segundas no; para la calibración de la cámara se utilizó el software libre Agisoft (Agisoft, 2012b) donde se obtuvieron los parámetros para los cálculos de la nube de puntos de las fotografías tomando unas fotografías desde varios ángulos a la plantilla que trae el software y luego son procesadas para calcular los parámetros de la cámara en particular ver figura 6.

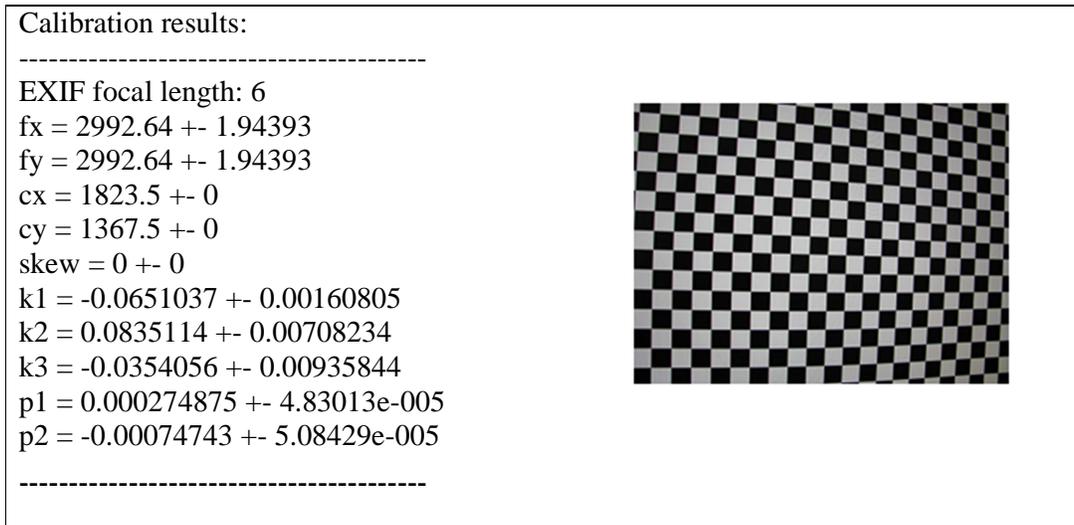


Figura 6. Parámetros de calibración (Agisoft, Lens, 2012b).

2.4. Puntos de Control en Tierra PCT

Con el fin de ubicar el MSD en un sistema de coordenadas reales los modelos generados por los diferentes software es necesario la ubicación espacial de los PCT (georeferenciación) donde se localizaron puntos de fácil identificación y repartidos en la zona de estudio. Estos PCT son identificados con una plantilla impresas en papel de tamaño 0.46×0.46 m y ubicados en tierra como se muestra en la figura 7 que luego fueron georeferenciados utilizando una estación total marca Trimble S6 DR PLUS.

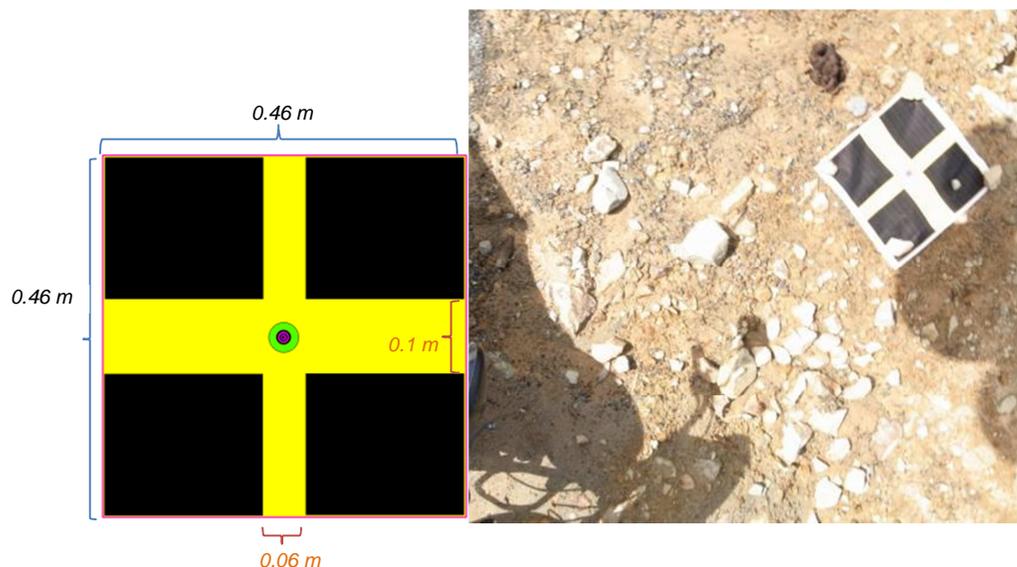


Figura 7. Marcadores Puntos de Control PCT.

ID	X	Y	Z
point 1	433556.526	605489.760	1138.917
point 2	433562.001	605473.637	1138.768
point 3	433559.612	605473.239	1138.267
point 4	433556.623	605462.151	1137.043
point 5	433562.898	605433.557	1134.773
point 6	433561.727	605459.711	1137.151
point 7	433558.588	605478.310	1137.848
point 8	433554.319	605473.747	1138.117

Tabla 3. Puntos de Control PCT levantados con Estación Total Trimble S6 DR PLUS.

Para una correcta georeferenciación los puntos fueron tomados en el sistemas de coordenadas WGS 84/UTM Zona 18N (codigo EPSG:32618).

2.5. Mosaico de imágenes y procesamiento

El avance tecnologico y la mejora en las camaras digitales permiten obtener mosaicos de imágenes de una forma facil y rapida, el tratamiento automatico de las imagenes se realizo con el software licenciado (Agisoft, PhotoScan, 2012a) y el software libre Insigth de (Mach, Open Source image based 3D modelling software, 2012) apoyado de (JAG3D, 2011) para la georeferenciación del modelo generado generado.

2.5.1. Software Licenciado PhotoScan

El trabajo con el software (Agisoft, PhotoScan, 2012a) se inicia con la selección de las fotografías a utilizar (254) mas adecuadas que abarcan la zona de estudio el control de calidad de las fotografías radica en eliminación de la fotografías borrosas y que no tienen contraste, una vez calibrada la camara mediante Lens de (Agisoft, Lens, 2012b) se introducen estos parametros a las fotografías cargadas en PhotoScan luego se procede a Orientar las fotos donde el programa calcula la ubicación de la camara a partir de la intersecciones de los puntos similares que son transformados en coordenadas espaciales de todos los puntos de las fotografías ademas es necesario realizar

otro control de calidad con el fin de seleccionar el area de estudio y eliminar los puntos que estan fuera de la zona de interes, el siguiente paso es crear una Textura que consiste en generar un modelo tridimensional 3D con textura solididad o textura de las fotografías ver figura 8.

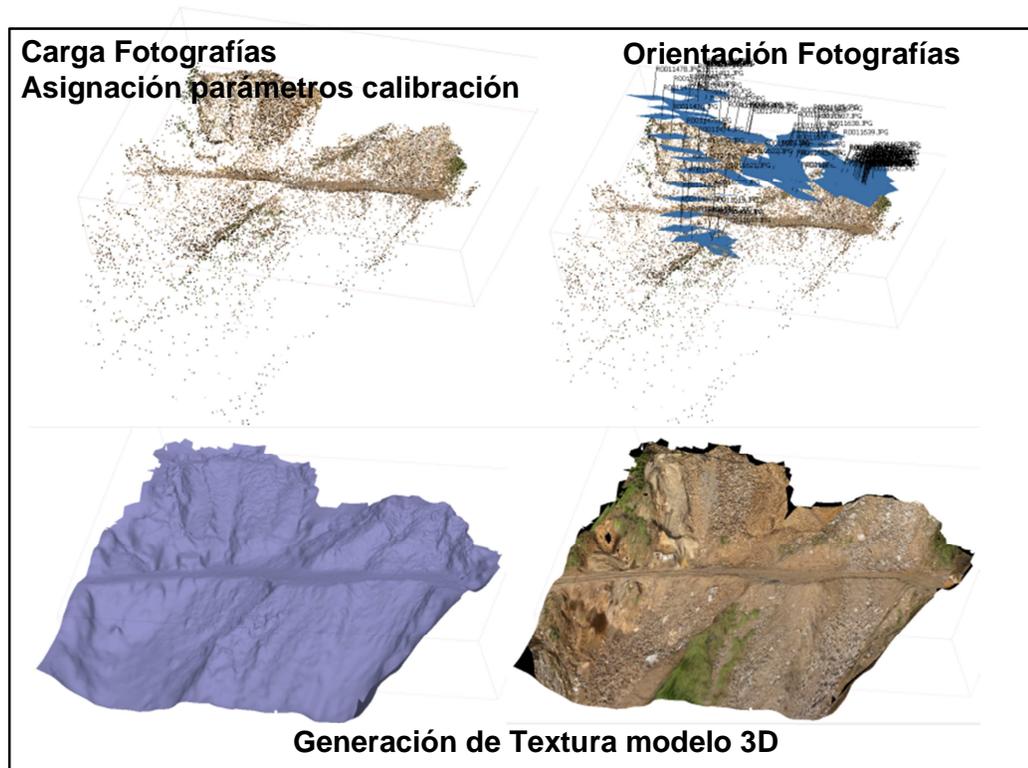


Figura 8. Procesamiento en PhotoScan (Carga de Fotografías- Calibración- Generación de Puntos-Orientación Fotos-Generación Textura.

Se procede a ubicar los puntos de control PCT Para asignar un sistema de coordenadas al proyecto cargado en PhotoScan que consiste en asignar un plano de referencia lo que permitira realizar analisis espaciales directamente en el modelo georeferenciados estos se pueden identificar directamente en cada fotografía donde aparezcan y luego realizar la orientación de las fotografías y un segundo método es construir la geometría y ubicar los puntos en el modelo 3D para luego realizar el ajuste. El primer método permite ser mas preciso ya que permiten colocar los puntos georeferenciados en cada imagen pero puede ser muy lento dada la cantidad de imágenes; se decidió por el segundo método para georeferenciar con los puntos de control PCT en el

sistemas de coordenadas WGS 84/UTM Zona 18N por que es un proceso automatico y por tener un alto numero de fotografías ver figura 9.

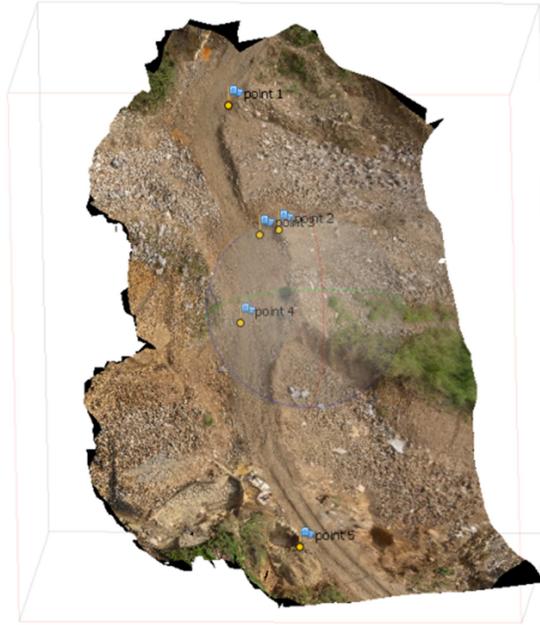


Figura 9. PCT y Asignación Sistemas de Coordenadas Modelo Tridimensional PhotoScan.

El software permite realizar el ajuste para disminuir el error mediante la optimización de los puntos de control donde se obtuvo un error máximo de 40 cm para la altura y 16 cm para la coordenada x tabla 2 este error se corrige desactivando los puntos con error mas alto o la eliminación de fotos mal referenciadas.

Usar	x /este	y /norte	z /altitud	error(m)
<input checked="" type="checkbox"/> point 1	433556.510...	605489.760...	1138.916681	0.016 (0.016, 0.000, -0.000)
<input checked="" type="checkbox"/> point 2	433562.000...	605473.636...	1138.730000	0.039 (0.000, 0.000, 0.039)
<input checked="" type="checkbox"/> point 3	433559.611...	605473.238...	1138.226700	0.040 (0.000, 0.000, 0.040)
<input checked="" type="checkbox"/> point 4	433556.623...	605462.150...	1137.043000	0.001 (0.000, 0.001, -0.000)
<input checked="" type="checkbox"/> point 5	433562.898...	605433.557...	1134.770000	0.003 (-0.000, -0.000, 0.003)
<input checked="" type="checkbox"/> point 6	433561.727...	605459.711...	1137.151561	0.000 (0.000, -0.000, 0.000)
<input checked="" type="checkbox"/> point 7	433558.588...	605478.310...	1137.848961	0.000 (-0.000, -0.000, -0.000)
<input checked="" type="checkbox"/> point 8	433554.319...	605473.747...	1138.117521	0.000 (-0.000, 0.000, -0.000)

Tabla 4. Ajuste Error Modelo PhotoScan.

La resolución de los detalles del modelo 3D generado por el modelo esta dado por la cantidad de puntos generados que en total fueron 43779 esta información de la nube de puntos se puede extraer en un archivo (.txt) mediante Agisoft PhotoScan donde en cada línea del archivo se encuentran las 3 coordenadas (x,y,z) separadas por comas

2.5.2. Software Libre Insight3d y JAD3D

El software libre Insight3d de (Mach, Insight3d. Open Source image based 3D modelling software, 2012) tiene la limitante que no soporta tanto volumen de imagen por que se elige una pequeña zona para realizar la generación del DSM además de que no realiza la transformación de la nubes de puntos al sistema de coordenadas reales por lo que es necesario apoyarse del software libre para transformación de coordenadas (JAG3D, 2011). El trabajo inicia con la carga de 12 imágenes luego la sincronización automática y calibración de la cámara donde el software identifica puntos en cada imagen y luego trata de realizar un seguimiento de estos puntos en otras fotos entonces las fotografías son calibradas lo que significa que la posición de la cámara y sus otros parámetros espaciales son calculados. Las pirámides representan las cámaras en la escena ver figura 10.



Figura 10. Procesamiento en Insight3d (Carga de Fotografías- Calibración- Generación de Puntos-Orientación Fotos).

La resolución de los detalles del modelo 3D generado por el modelo esta dado por la cantidad de puntos generados que en total fueron 26643.

Una vez generada la nube de puntos es necesario identificar puntos de referencia que correspondan a los levantados con estación total ya que el software no suministra esta información es necesaria exportarlo al software libre (MeshLab, 2011) o en el software licenciado ArcGis donde se importa la tabla de nubes de puntos para identificar las coordenadas de los puntos que tienen levantamiento con estación total o que están muy próximos, Insight3d asigna un sistema de coordenadas por defecto por lo que se debe identificar las coordenadas originales y su correspondencia con las coordenadas levantadas con estación total en el sistema de coordenadas a exportar WGS 84 para identificar estos puntos es necesario crear un archivo fuente (que corresponde a la nube de puntos) y un archivo destino (que corresponde al archivo con los puntos levantados con estación total) ver figura 10 estos archivos deben ser guardados con extensión (.txt) delimitados por tabulaciones y tener un consecutivo y coordenadas x,y,z sin encabezado.

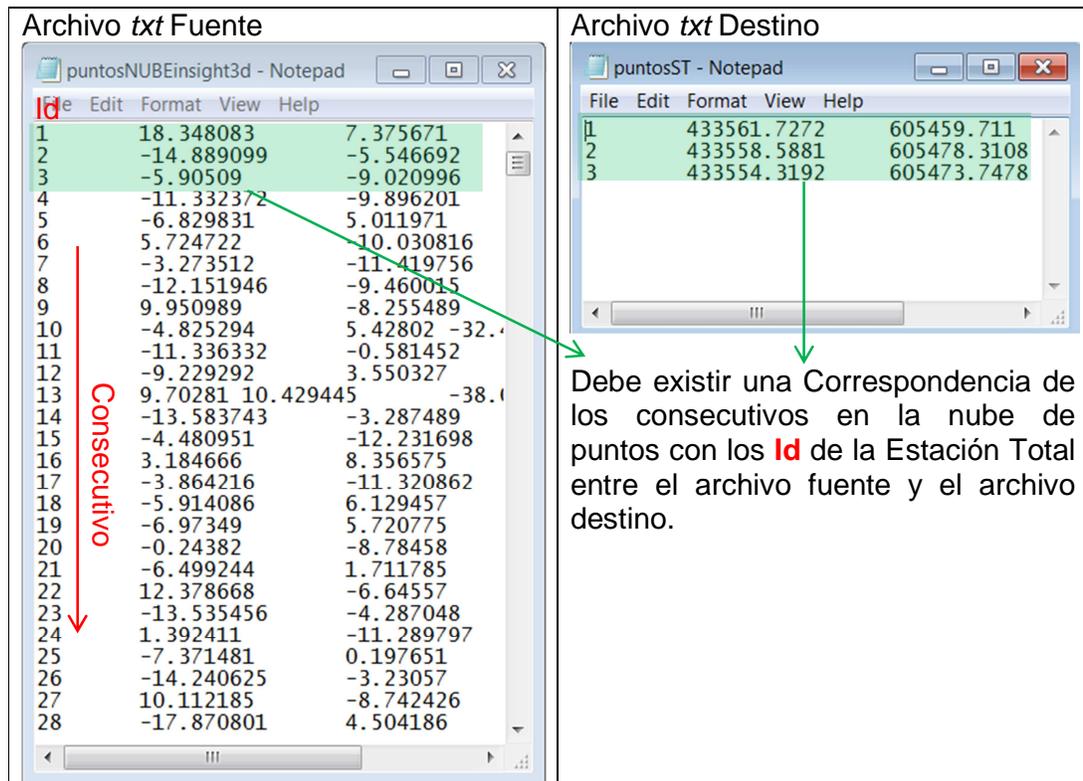


Figura 11. Archivos *.txt Fuente (nube puntos) y destino para transformación de Coordenadas.

(Markaeology, 2010) Describe como transformar el archivo de puntos al mismo sistema de coordenadas de los puntos levantados con estación total utilizando el software libre Java Graticule 3D (JAG3D, 2011) este programa realiza transformación de coordenadas a un sistema de coordenadas conocidas WGS 84/UTM, en la pestaña Modulo se selecciona Coordinates Transformation los cálculos se realizan en 3 Dimensiones y en la pestaña File se selecciona los archivos txt de la figura 10 donde *File/Source system file* corresponde al archivo txt nube de puntos generado en Insight3D y *File/Target system file* corresponde al archivo txt con los puntos de control PCT el software realiza una transformación de la nube de puntos al sistema de coordenadas de los PCT WGS 84/UTM Zona 18N que corresponden al sistema de coordenadas en que fueron levantados los puntos de estación total ver figura 12.

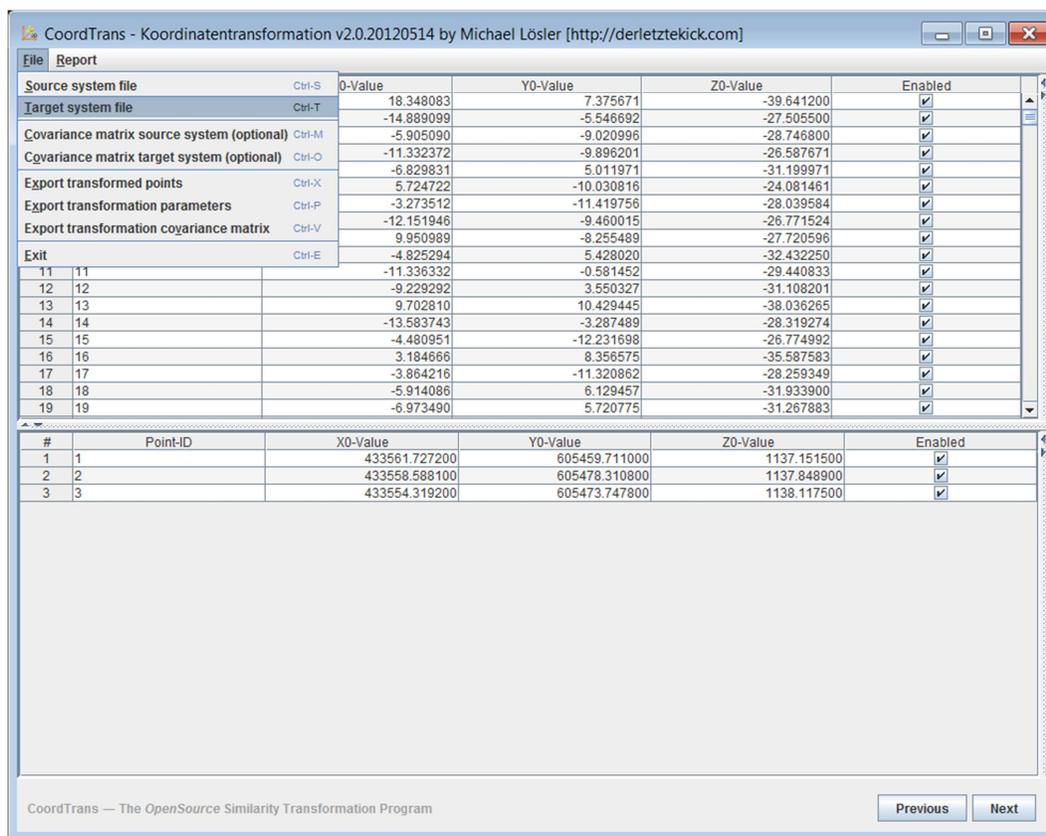


Figura 12. Transformación de Coordenadas Java Graticule 3D JA3D.

El programa se ejecuta hasta que genere el archivo con las nuevas coordenadas que corresponden a un archivo (.txt) con la nueva nube de puntos transformados según sistemas de coordenadas de los puntos PCT WGS 84/UTM Zona 18N.

3. RESULTADOS

El principal producto del software licenciado y libre son la nubes de puntos con una elevación conocida transformados según sistemas de coordenadas reales WGS 84/UTM Zona 18N. Esta nube de puntos es el insumo mas importante para generar una superficie DSM y su posteriores análisis de superficie SIG; el modelo de PhotoScan es exportado en la extensión (.dae) o (.txt) y el modelo de Insight3d es exportado como (.txt) en la extensión (.wrl) para luego ser importado en ArcGis o GvSig. Todo el análisis de superficie se realizo con la

nube de puntos y la creación de un modelo Raster y un Modelo TIN (Red de Triángulos Irregulares) para el software licenciado y libre.

Debido a que la mayor área es cubierta por el modelo del software licenciado Agisoft PhotoScan se realiza un análisis de superficie DSM de (pendientes, sombras, curvatura) mediante la herramienta 3D de ArcGis.

3.1. Modelo Raster

Se utilizó la herramienta de análisis 3D de superficie de ArcGis con la nube de puntos del software licenciado (Agisoft, PhotoScan, 2012a). con la elevación de cada punto el cual mediante interpolación (Topo to Raster) se genera el Raster que es insumo muy importante para generar modelos 3D y tener operaciones muy interesantes sobre superficies. Por defecto Agisoft PhotoScan arroja un tamaño de pixel= 0.192009 m para la horizontal y la Vertical se debe asumir un estándar cartográfico que garantice la calidad del modelo Raster según la altura vuelo y precisión de la cámara utilizada en la tabla 2 se tiene que las fotografías fueron tomadas a una altura promedio de 40 metros sobre la superficie donde se tiene una resolución de pixel de 20 cm aproximada que coincide con el valor de pixel=0.19 m arrojado por Agisoft PhotoScan.

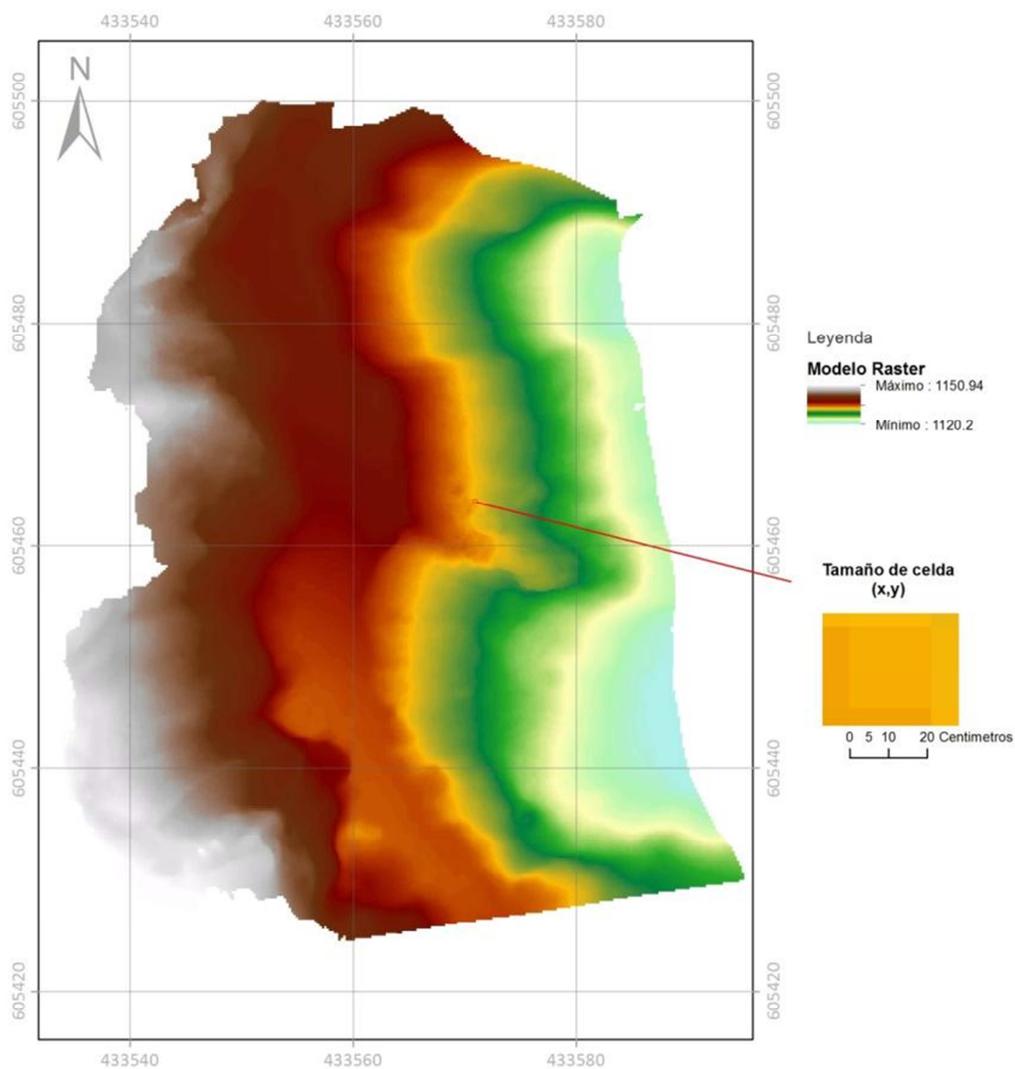


Figura 13. Modelo Raster DSM software licenciado Agisoft.

Para el software libre Insight se procede de la misma forma obteniendo un raster para un área menor debida a las limitantes en el procesamiento de las imágenes.

Insight no suministra valores de precisión para la obtención del modelo 3D por lo que se asumen los reportados por Agisoft PhotoScan ver figura 14.

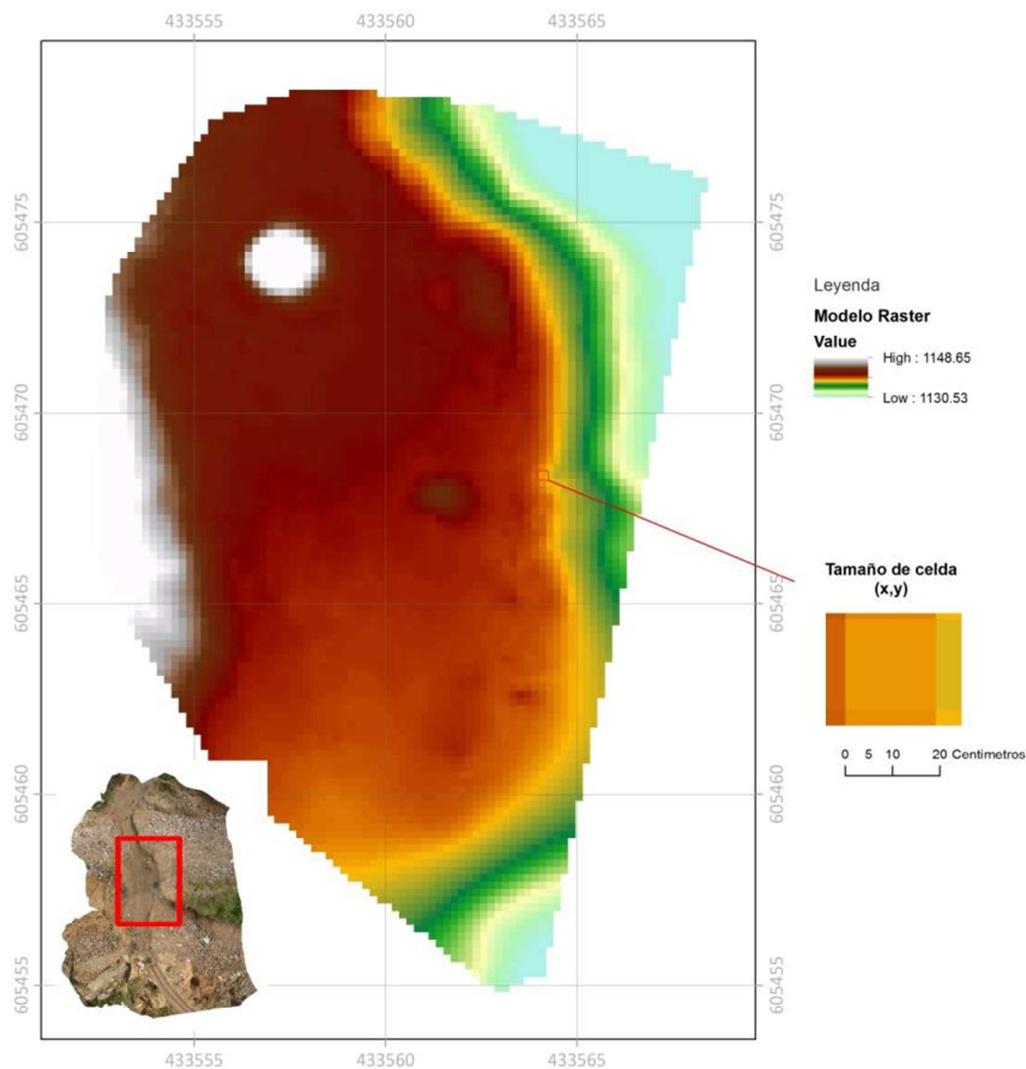


Figura 14. Modelo Raster DSM software libre Insight.

3.1.1. Modelo 3D Red Triangular TIN

Desde un modelo Raster se puede generar una estructura tridimensional del Terreno en formato vectorial llamada TIN Red de Triángulos Irregulares donde a cada triangulo representa una pequeña porción de la superficie terrestre y lleva asociado un valor de orientación y de pendiente.

En el calculo del TIN es importante tener en cuenta la tolerancia z o nivel de sensibilidad que corresponde a la diferencia entre el modelo TIN y el Raster

original con este nivel de sensibilidad se busca que el perfil del modelo TIN sea lo mas similar al perfil del Raster original por lo que se sugiere un valor pequeño para el calculo aunque se genera una capa mas densa y mas fina se facilita los análisis visuales de superficie ver figura 15 para el modelo de Agisoft PhotoScan.

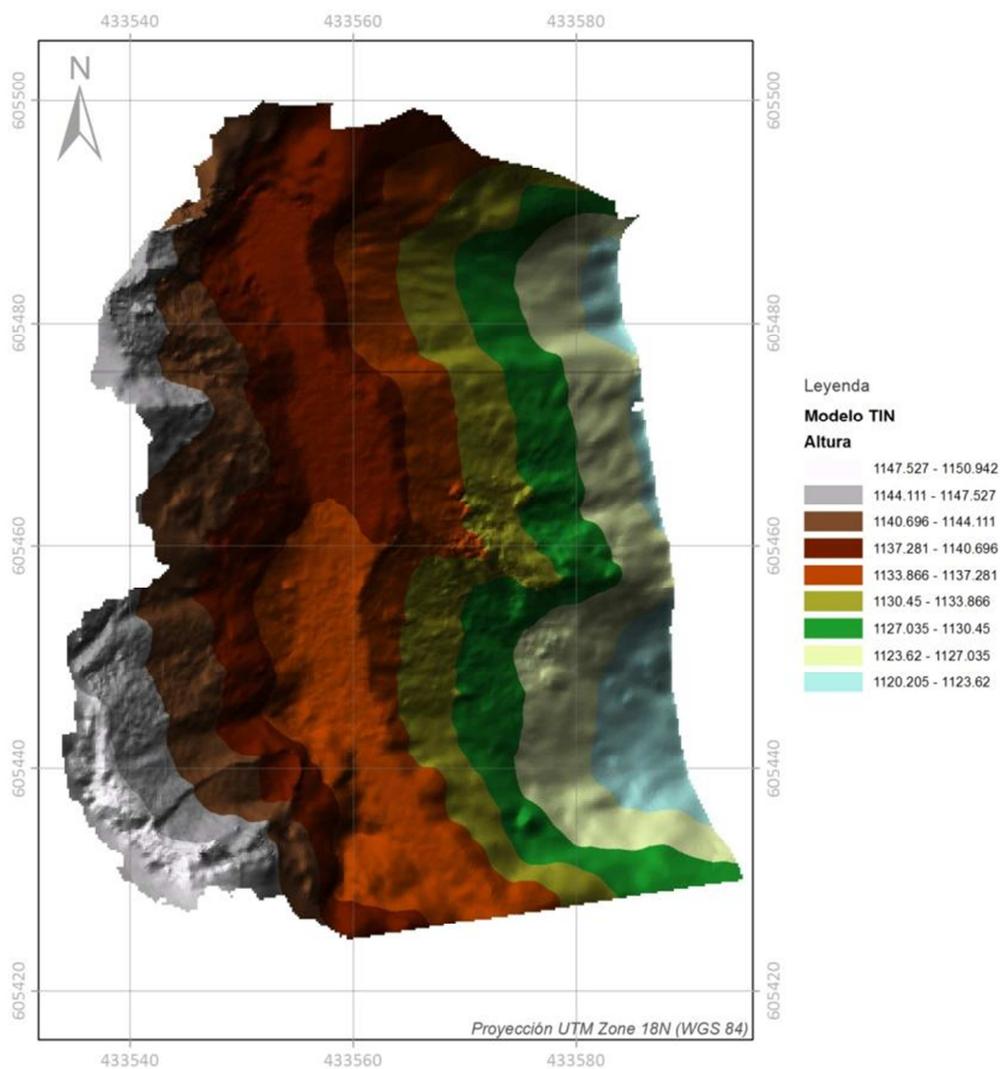


Figura 15. Modelo 3D Red Triangular TIN software licenciado Agisoft.

Para el software libre Insight también se realiza el mismo procedimiento que el software licenciado donde se obtiene una estructura vectorial 3D que muestra la forma de la superficie según el Raster fuente ver figura 16.

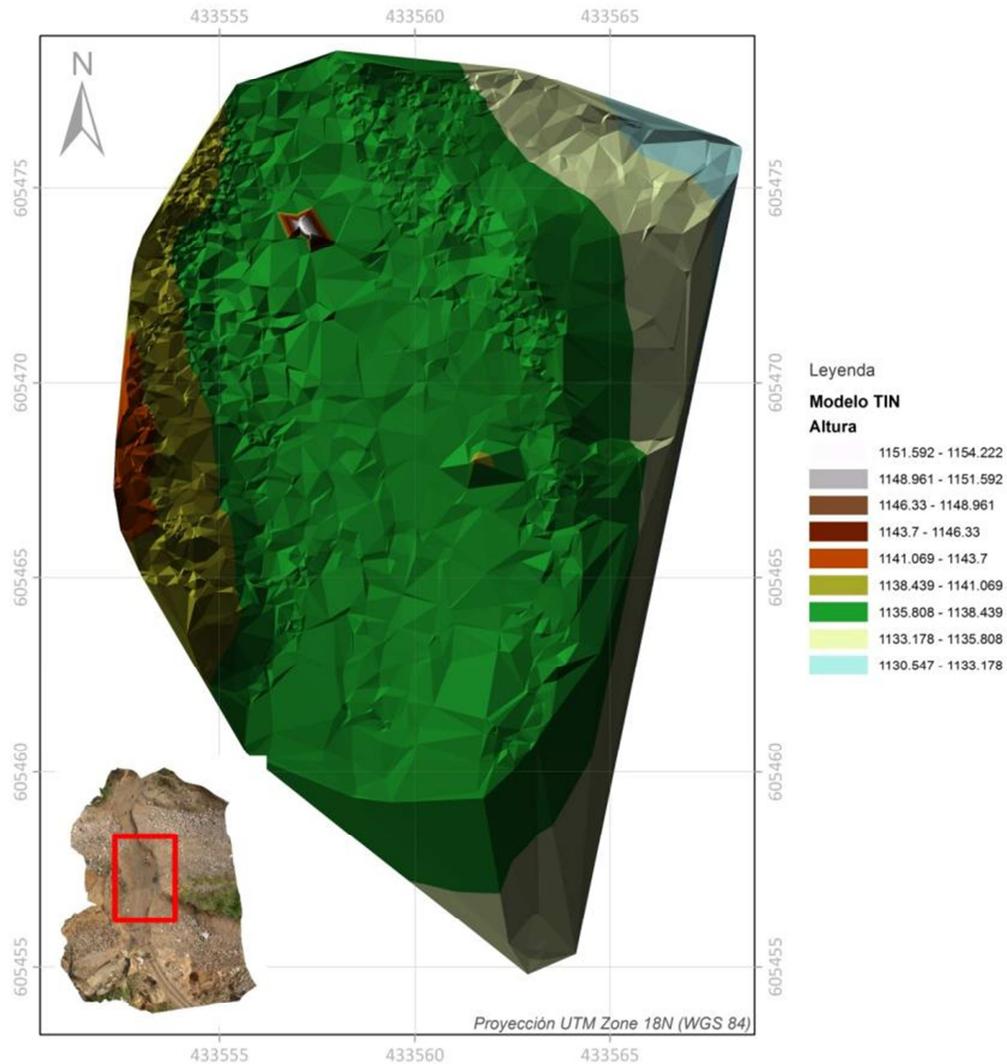


Figura 16. Modelo 3D Red Triangular TIN software libre Insight.

3.1.2. Orientación de pendientes Aspecto

Mediante el Raster generado con la nube de puntos para el software licenciado Agisoft PhotoScan se realiza el análisis de aspecto u orientación de la pendiente con la herramienta de análisis espacial de ArcGis (Spatial Analyst Tools/Surface/Aspect) este cálculo agrupa las zonas según su orientación en diferentes colores. La identificación de planos de fallas y estructuras planares son importantes para identificar zonas de interés por ejemplo las áreas rojas

que son zonas donde la pendiente desciende hacia el norte y las áreas azules la pendiente desciende hacia sur ayuda a encontrar lineamientos o inclinación de planos de fallas y diaclasas en esa dirección, las celdas guardan valores de azimuth de inclinación del plano, ver figura 17.

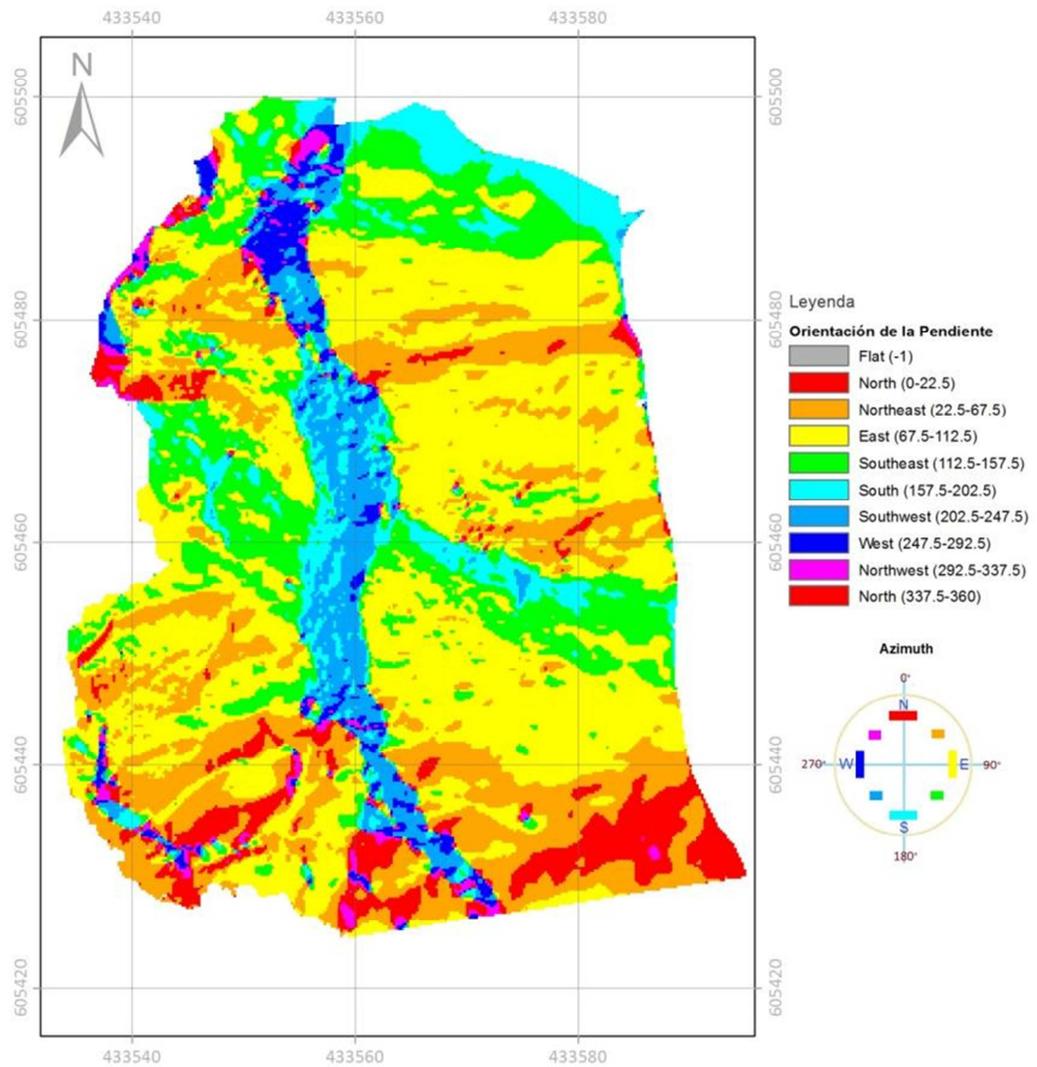


Figura 17. Modelo de Superficie Mapa Aspecto - Orientación de la Pendiente.

3.1.3. Mapa de Pendientes

El análisis de pendientes se realizó mediante el estudio de superficie con la herramienta (Spatial Analyst Tools/Surface/Slope) de ArcGis para el área de estudio donde se observan tres (5) patrones de pendientes bien diferenciados, los cuales se describen según el histograma de la figura 18 que muestra que la pendiente promedio para la zona de estudio es de 9%. Las clases que se eligen son según el análisis de la zona de estudio con el fin de reducir la variabilidad espacial y homogenizar las zonas.

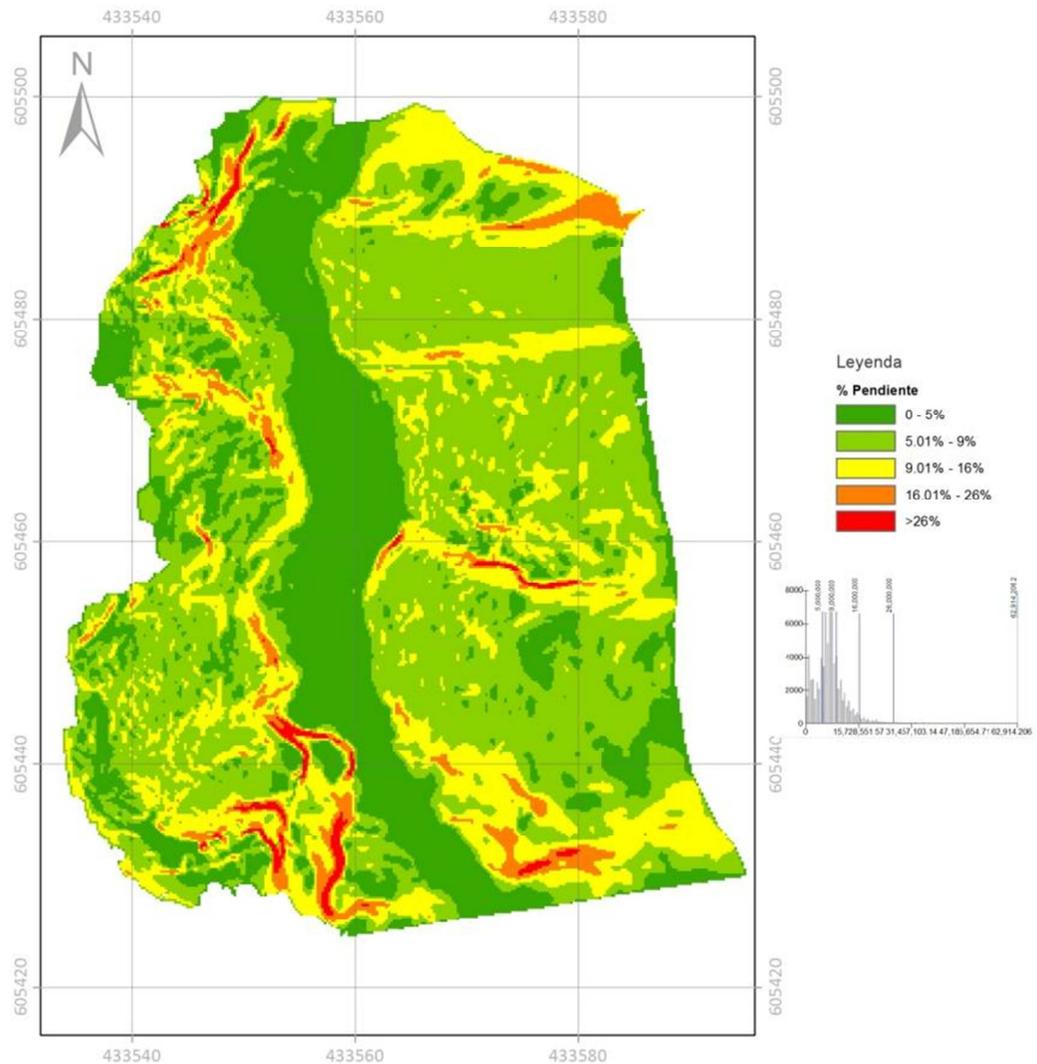


Figura 18. Modelo de Superficie Mapa % Pendiente.

3.1.4. Mapa de Sombras (Hillshade)

Análisis vistoso que se realiza con la herramienta (Spatial Analyst Tools/Surface/Hillshade) de ArcGis que modela las sombras que se producen en el terreno para ver áreas iluminadas y áreas en penumbras por lo que se necesita la ubicación del sol en términos de (Azimuty) y la altitud en (Grados) con respecto al horizonte mas próximo. Con el fin de determinar rasgos estructurales se asignaron diferentes valores de Azimuth y altitud por ejemplo para Colombia la ubicación del sol para las 7 am el sol sale por oriente que corresponde a un Azimuth=90° y una altitud aproximada de 15° con respecto al horizonte se observa en la figura 19 a) rasgos estructurales sombreados en las zonas Sur – Oeste, al realizar una variación de Azimuth=155° e inclinación 15° se observan mas rasgos superficiales estructurales figura 19 b).

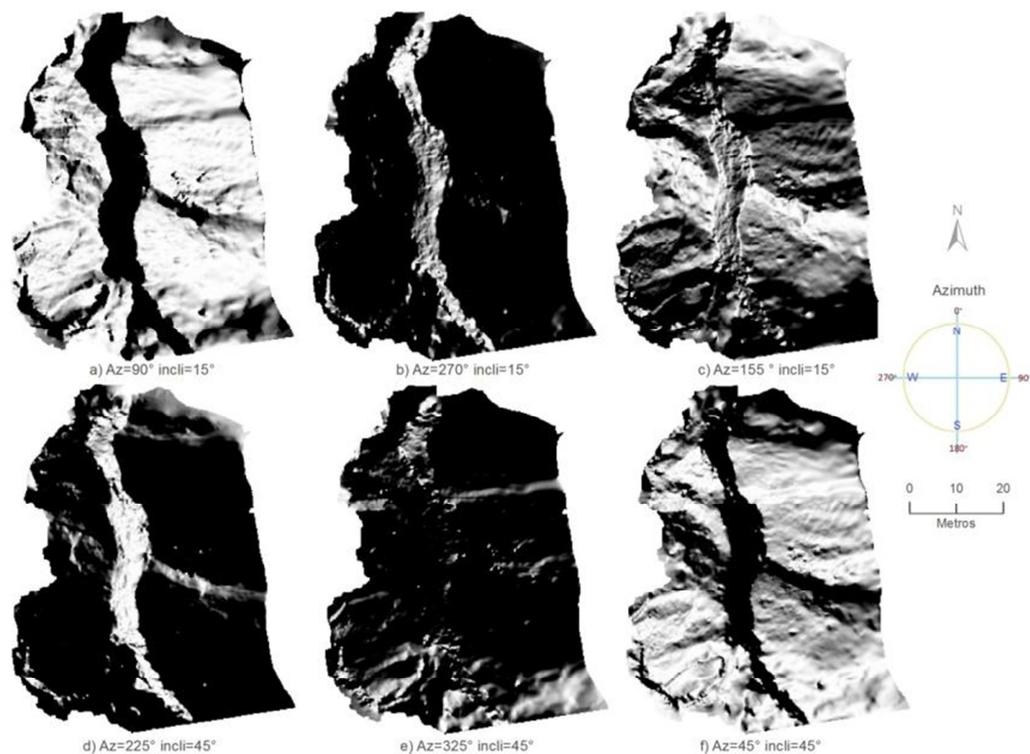


Figura 19. Modelo de Superficie Mapa de Sombras (Hillshade).

3.1.5. Forma de la pendiente (Curvatura)

El análisis de curvatura se realizó mediante el estudio de superficie con la herramienta (Spatial Analyst Tools/Surface/Curvatura) es una variable topográfica que capta las variaciones de la pendiente es decir si una parte de la superficie es cóncava, convexa o plana es muy útil para identificar áreas de rápido cambio de pendiente o aspecto lo que permite una mejor visualización de características geológicas estructurales, donde se determina zonas cóncavas (valores negativos), convexas (valores positivos) o planas (valores igual a cero) ver Figura 20.

En el análisis estructural de superficie la dirección de máxima pendiente (curvatura de Perfil) y la dirección perpendicular a la máxima pendiente (Curvatura Planar) tienen gran significado en el análisis estructural por que determinan zonas de interés geomorfológico.

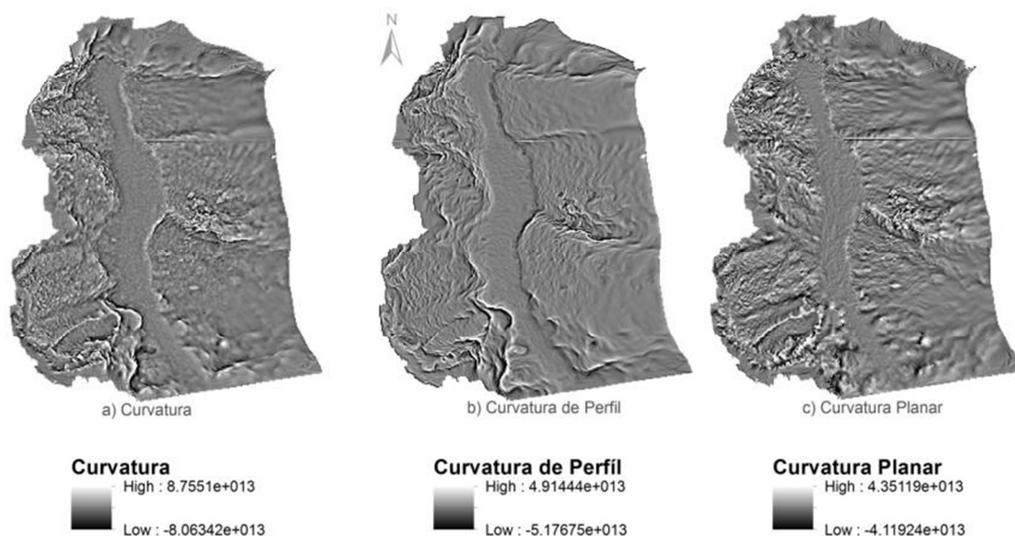


Figura 20. Modelo de Superficie Mapa de Curvatura.

La curvatura de Perfil esta relacionado con la aceleración o deceleración del flujo de agua y la curvatura Planar con la convergencia o divergencia del flujo de agua. Las principales estructuras geológicas están muy asociadas a algunos flujos de agua por lo que es importante identificar las zonas de erosión o deposición que determina la curvatura de Perfil y la convergencia o divergencia de flujo determinadas por la curvatura Planar. Para los Raster de Curvatura de Perfil y Curvatura Planar de la figura 20 b) y c) los valores mas altos representados con colores claros reflejan la desaceleración y divergencia respectivamente y los valores mas altos (colores oscuros) representan la aceleración y convergencia respectivamente.

3.1. Ortofoto

Las ortofotos exportadas por el software licenciado de Agisoft PhotoScan mediante el método de fusión en mosaico son una fuente importante de información con imagen de alta resolución y una escala uniforme libre de deformaciones combinando las características de detalle de una fotografía aérea con las propiedades geométricas de un plano; el tamaño de pixel exportado es de $4.01882 \times 10^{-8} \text{m} \approx 4 \text{mm}$ donde se puede apreciar objetos de tamaño hasta 5 cm ver figura 21. Estas ortofotos son exportadas en un sistema de referencia local WGS 84/UTM Zona 18N permitiendo realizar medidas de distancia y angulos con alta presición. A diferencia con una fotografía aérea simple, que siempre presentará deformaciones causadas por la perspectiva, el tipo de lente, la altura o la velocidad a la que se movió la cámara esta distorsiones esta mas marcada en los extremos de las fotografías no ortorectificadas y es corregida con los parámetros de calibración calculados por (Agisoft, Lens, 2012b). Para el software libre Insight no se tiene la opción de generar calibración de la cámara por tal motivo no se puede ortorectificar.

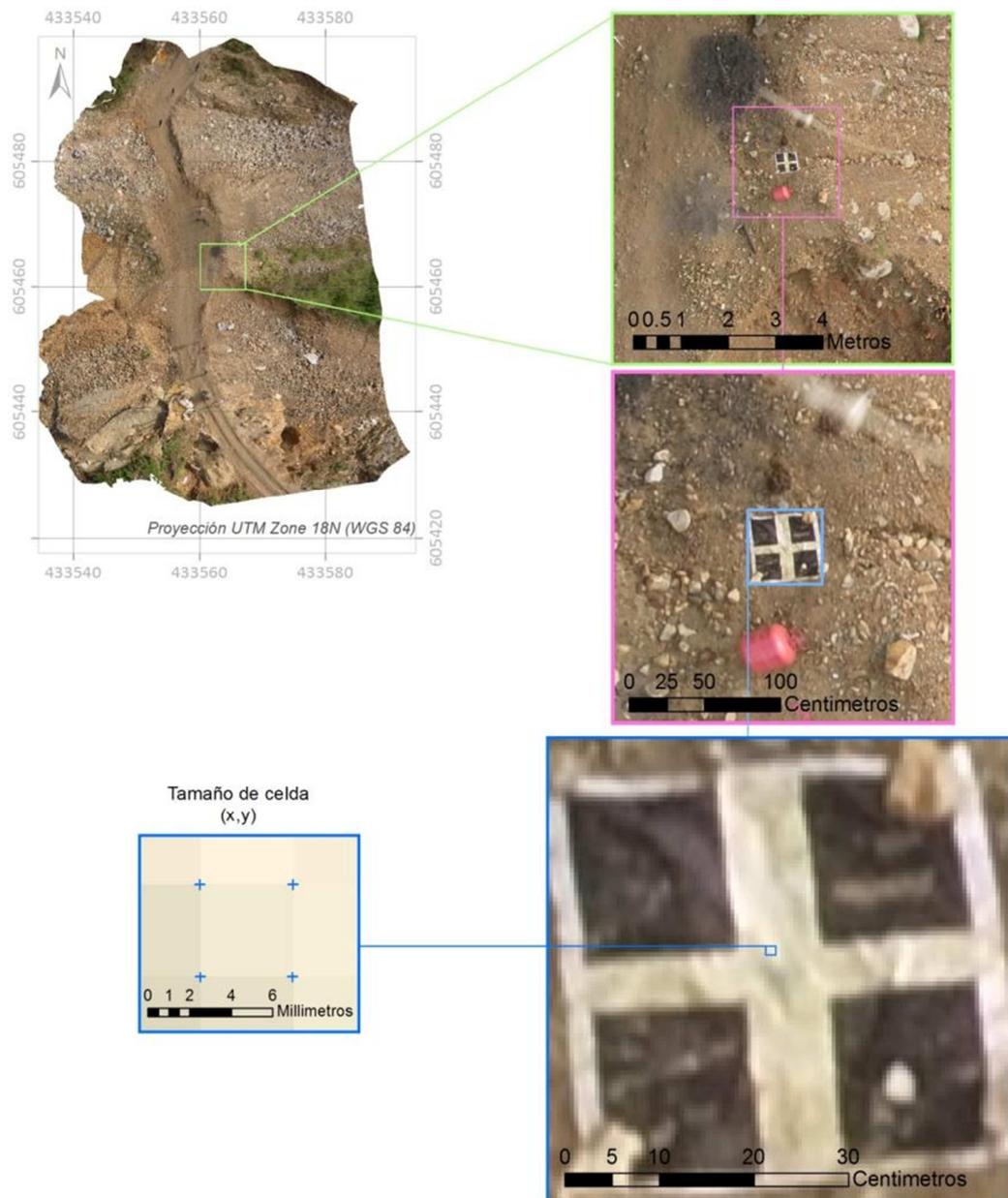


Figura 21. Ortofoto Alta resolución Agisoft PhotoScan.

3.2. 3D Visualización

Con la visualización 3D existe la posibilidad de combinar capas con representaciones muy efitivas de los modelos de superficie generados y con el detalle

Cuando se tiene una información tridimensional TIN en planta también se puede modelar en 3D con ArcScene (ver en perspectiva) en el cual se puede navegar cambiando el ángulo y realizando zoom es usado para la visualización y presentación del modelo 3D usando una combinación del TIN y ortoimagen ver figura 22. Estas visualizaciones pueden ser exportadas en formato de video o PDF 3D para usuarios que no tienen herramientas para la interacción SIG.

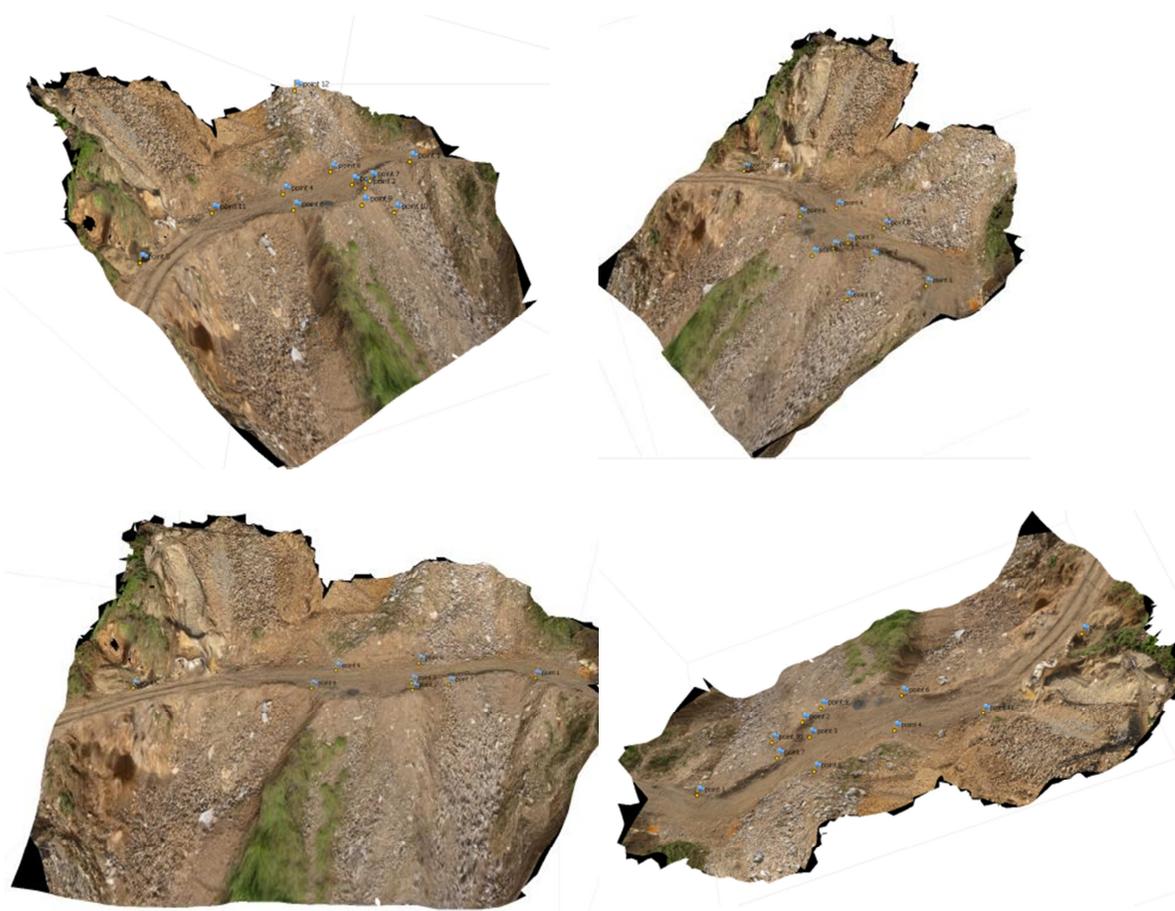


Figura 22. Escenas 3D alta definición.

3.1. Geología Estructural

Para el análisis estructural es muy importante asociar el análisis regional que se tiene realizado por diferentes autores (Consulting, Telluris, 2010) y

(Ortiz, 2010) a una escala de trabajo regional. Y con el apoyo del trabajo del muestreo de superficie se definieron los principales rasgos estructurales que se encuentran demarcados por la influencia del Sistema de Falla Romeral que se caracteriza por un conjunto de fallas verticales con orientación N-W y buzamiento hacia el este y dentro de la depresión estructural Cauca-Patía, donde aumenta el fracturamiento representado principalmente por fracturas de tensión relacionadas a la compresión NW-SE y al movimiento de rumbo sinistral entre las fallas del Cauca-Patía al W y Romeral al E. Este fracturamiento y fallas corresponde a las zonas de interés mineral para la explotación de oro (Scott E, Wilson Consulting Inc, 2009).

3.2. Comparación Licenciado vs Libre

Se realizo una mascara con el fin de tener una comparación del Raster y TIN debido a que el área del software libre Insight es menor que la del software licenciado Agisoft esta área abarca 6 PCT de los 8 de toda la zona de estudio, en la figura 23 se observa que el Raster de software licenciado Agisoft presenta una mejor representación del terreno en comparación con el software libre Insight donde se observan dos zonas anómalas con valores muy altos para la coordenada z además que el rango para la altura en el Raster del software Libre Insight es mas amplio que en el de software libre.

Aunque para la generación del modelo TIN se utilizo la misma tolerancia z el software licenciado presenta la superficie de una forma mas acorde a la realidad en comparación con el software libre.

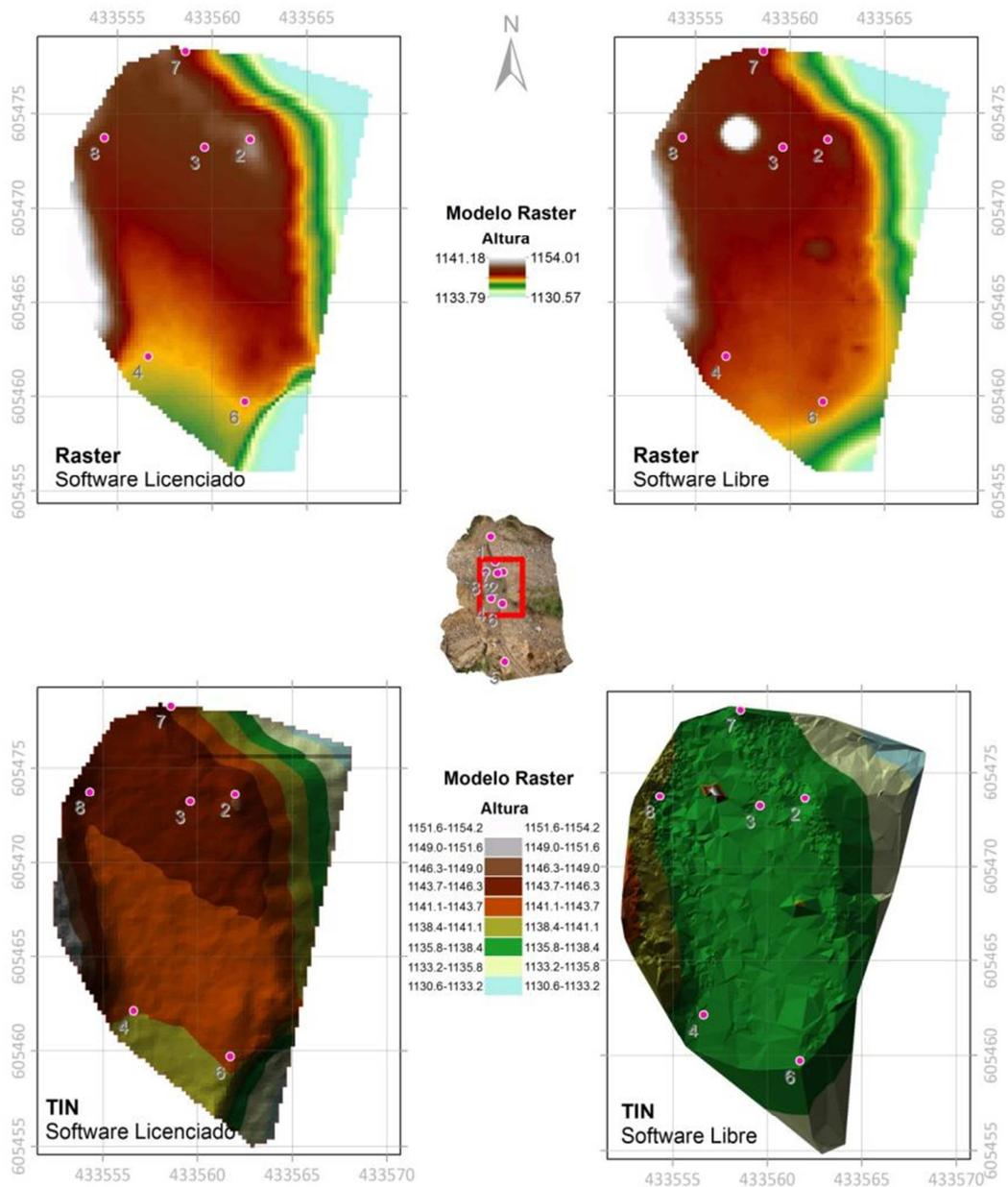


Figura 23. Comparación Software licenciado vs Libre.

Se comparo los valores de los 6 PCT con el valor de la altura que se extrae de cada uno de los Raster para la coordenada z con la herramienta Spatial Analyst Tools/Extraction/Extract Values to Points) donde se observa una gran correlación positiva que existe entre las coordenada z de la estación total y el valor de la altura extraido del Raster de Agisoft ver tabla 5 figura 24.

Punto Id	Estación Total	Raster Insight	Raste Agisoft
2	1138.768	1137.873	1138.724
3	1138.267	1137.823	1138.268
4	1137.043	1137.414	1137.098
6	1137.151	1137.188	1137.191
7	1137.848	1138.017	1137.884
8	1138.117	1138.191	1138.196

Tabla 5. Valores de Altura extraídos de Estación Total, Raster software libre Insight, Software licenciado Agisoft PhotoScan.

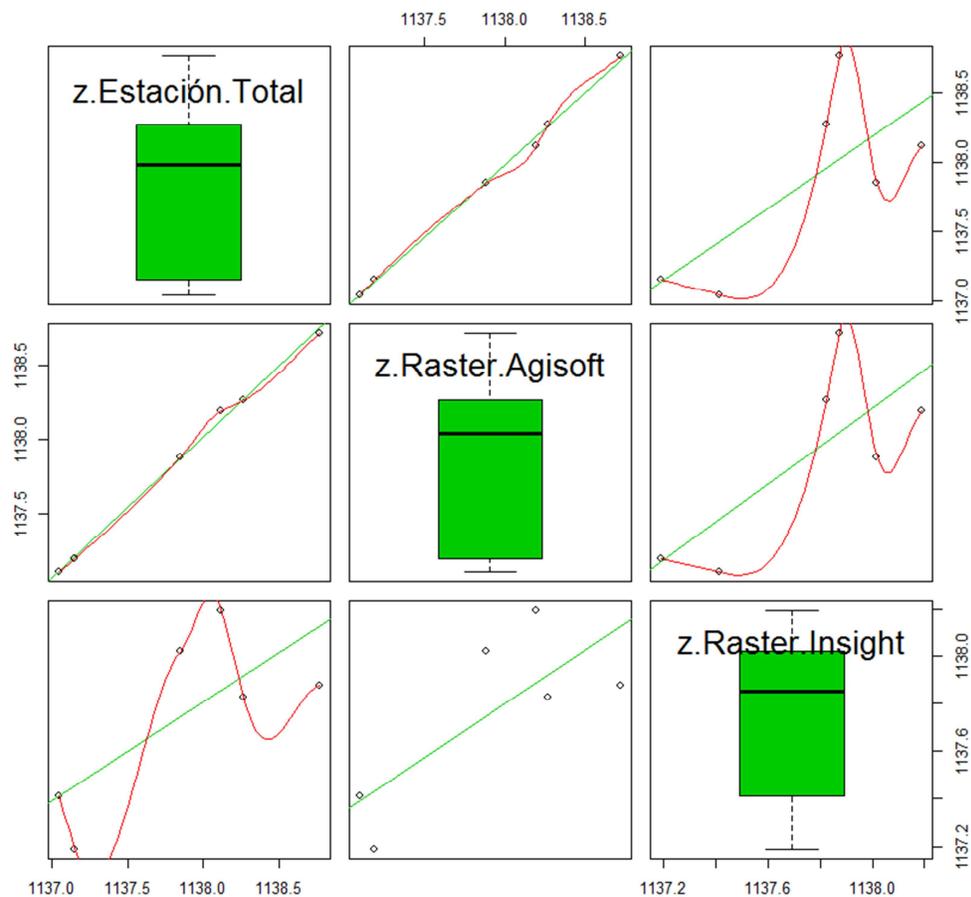


Figura 24. Matriz de Correlación valores de altura Estación Total, Raster software libre Insight, Software licenciado Agisoft PhotoScan.

La tabla 5 y figura 24 muestra que la mayor diferencia esta entre software libre vs los datos de la estación total marcados por la fuerte correlación entre el software licenciado Agisoft y el valor de la altura con la estación total.

Con el fin de encontrar visualmente la calidad de los resultados se evalúa mediante un algebra de mapas con la herramienta de ArcGis (Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator) para calcular la diferencia del Raster del software licenciado menos el Raster del software libre que muestra que hay diferencia hasta de 8 metros en las zonas oscuras y diferencia hasta 3 metros en las zonas claras. Estas diferencias están marcadas en los extremos de la zona analizada ver figura 24.

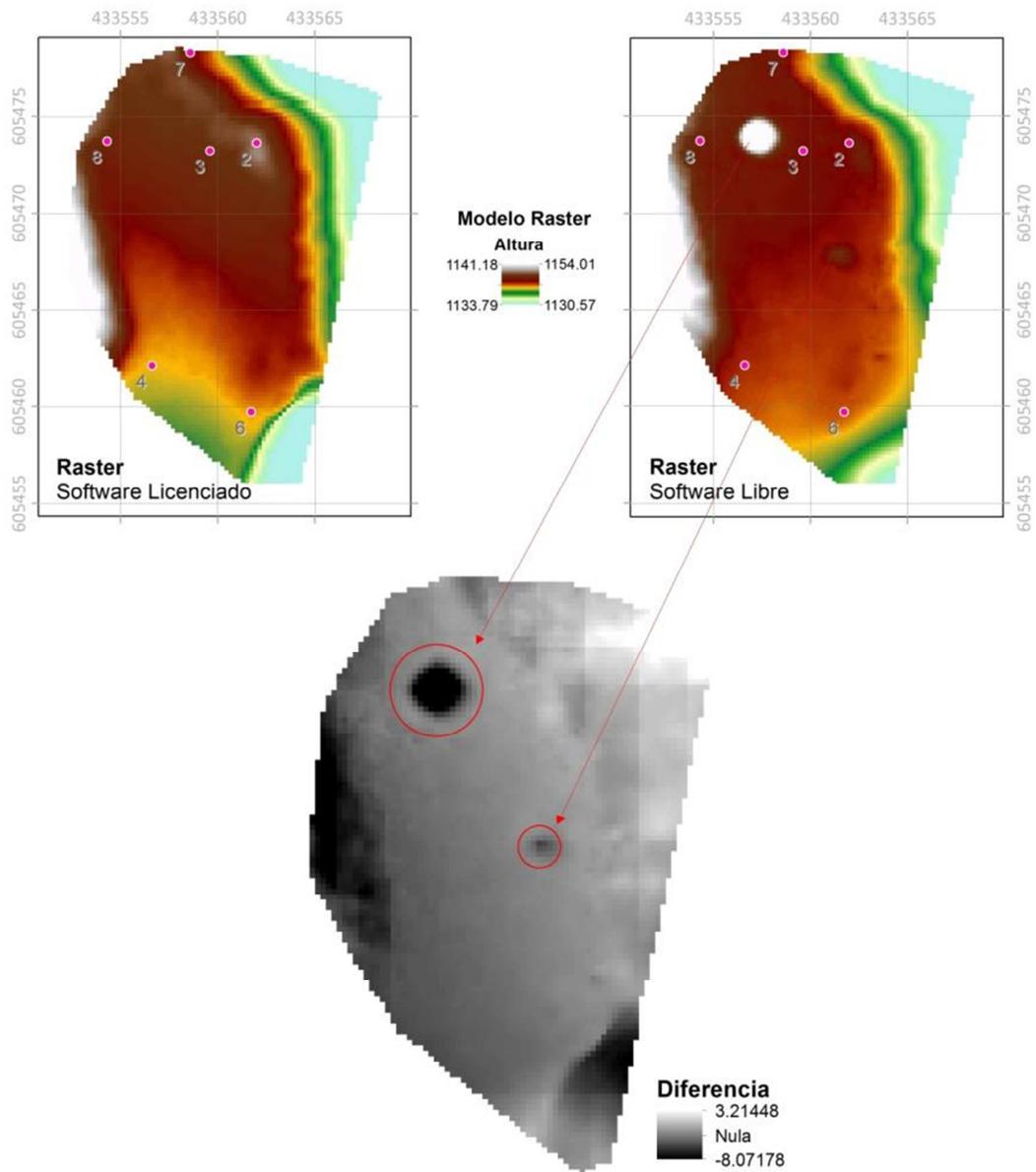


Figura 25. Algre de mapas (Diferencia Raster software licenciado Agisoft – Raster software libre Agisoft).

4. IMPLEMENTACIÓN (CASO DE ESTUDIO GEOLOGÍA ESTRUCTURAL CIEN PESOS - MARMATO)

4.1. Muestreo de Superficie

La descripción detallada de la geología están fuera del alcance de este trabajo pero como complemento a los estudios realizados por (Scott E, Wilson Consulting Inc, 2009) y (Consulting, Telluris, 2010) donde identificaron tendencias estructurales y definieron rasgos litológicos se tomaron para este trabajo 27 muestras representativas de rocas en canal con fragmentos continuos para realizar una corroboración además de tener un levantamiento a una escala mas pequeña de trabajo donde se identificaron rasgos estructurales y geológico resumidos en la tabla 6 y figura 26. El levantamiento del muestreo se realizo con GPS con un error de hasta 5 metros por lo que fue necesario realizar una re-localización para ajustar la ubicación de las muestras espacialmente esto con el apoyo del modelo 3D generado por el software licenciado Agisoft PhotScan ver figura 6.

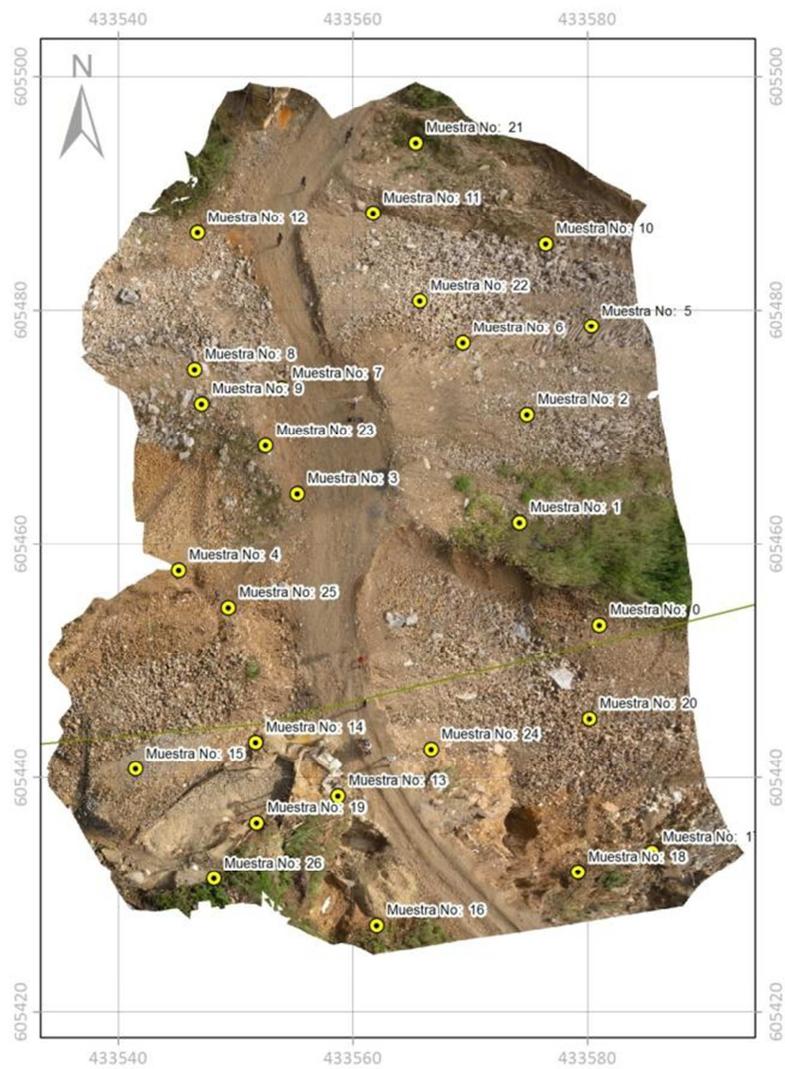


Figura 26. Mapa Localización Muestreo Superficie.

Muestra No	Litología	Estructura Tipo	Structura Dip	Structura Dip Az
0	Dacita Porfídica	Contacto	50	215
1	Dacita Porfídica	Diaclasa	55	35
2	Cuaternario Coluvión	Falla Definidala Inferidad	85	150
3	Dacita Porfídica	Diaclasa	55	220
4	Dacita Porfídica	Falla Definida	50	65
5	Cuaternario Coluvión	Falla Definida	85	165
6	Cuaternario Aluvión	Falla Definida	65	220
7	Dacita Porfídica	Diaclasa	75	45
8	Dacita Porfídica	Contacto	90	155
9	Dacita Porfídica	Diaclasa	20	220
10	Pórfido Andesítico	Venas (>10cm)	75	310
11	Cuaternario Coluvión	Falla Definidala Inferidad	90	50
12	Pórfido Dacítico	Contacto	75	50
13	Pórfido Dacítico	Venas (>10cm)	80	215
14	Cuaternario Aluvión	Falla Definidala Inferidad	95	135
15	Cuaternario Aluvión	Contacto	80	215
16	Cuaternario Aluvión	Venas (>10cm)	50	35
17	Cuaternario Coluvión	Falla Definidala Inferidad	55	150
18	Cuaternario Coluvión	Falla Definidala Inferidad	85	220
19	Pórfido Dacítico	Venas (>10cm)	85	65
20	Cuaternario Coluvión	Falla Definidala Inferidad	75	165
21	Pórfido Dacítico	Diaclasa	85	50
22	Cuaternario Coluvión	Falla Definidala Inferidad	55	155
23	Dacita Porfídica	Diaclasa	65	220
24	Cuaternario Aluvión	Falla Definidala Inferidad	85	165
25	Pórfido Dacítico	Diaclasa	65	220
26	Pórfido Dacítico	Venas (>10cm)	55	65

Tabla 6. Relación de Muestras con descripción geológica y estructural

De la tabla 6 y la descripción estructural que se muestran en el mapa de la figura 27 se observa que las principales estructuras en el muestreo de campo son las diaclasas, fallas y venas estas últimas muy importantes para las labores mineras ya que determinan valores de Oro muy alto. Gracias al detalle de las ortofotos se puede realizar un trabajo con el modelo 3D donde se puede apreciar muestra de roca con una familia de diaclasas y otra muestra con una pequeña vena sin necesidad de ir a campo ver figura 27.

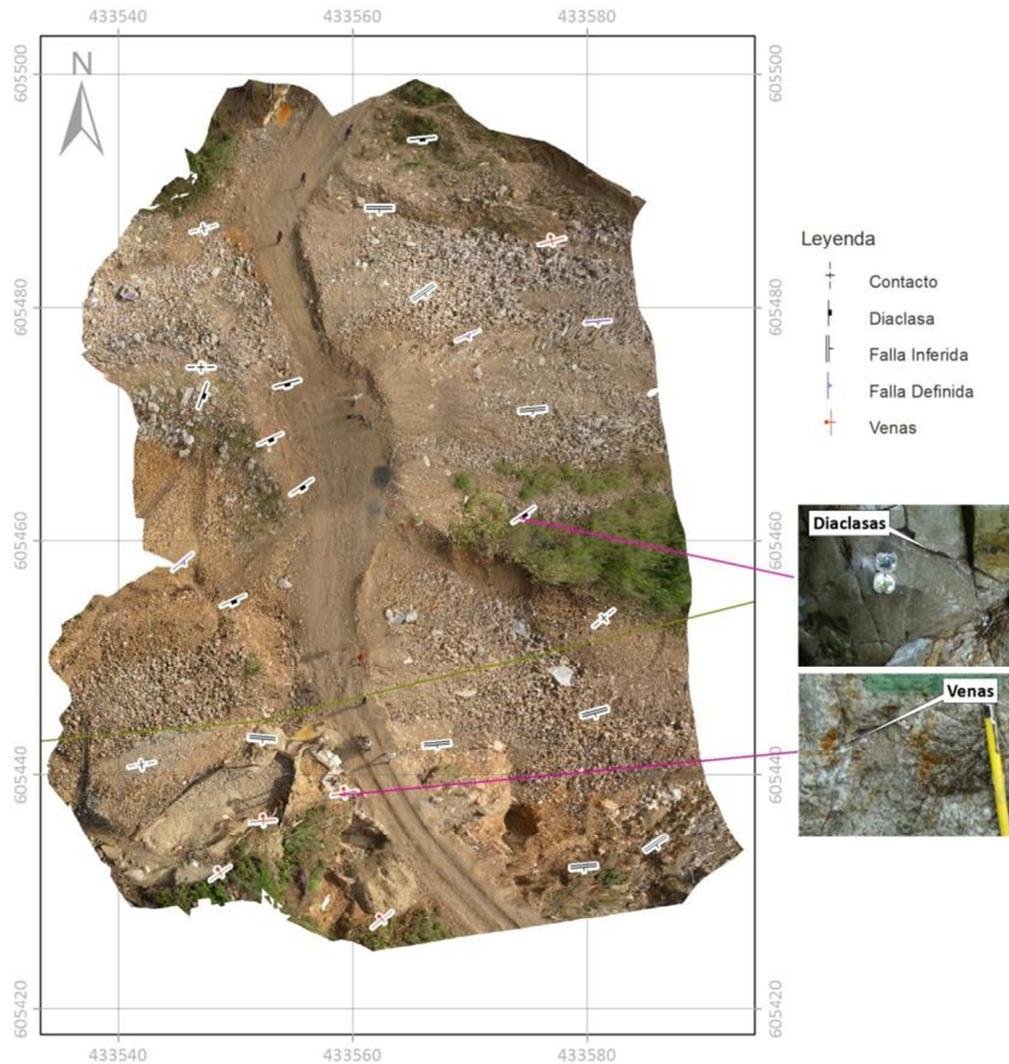


Figura 27. Representación Diferente estructuras observadas en el muestreo de Superficie.

4.2. Geología Unidades Superficiales

Según el estudio de (Ortiz, 2010) y el muestreo de rocas realizado las unidades de rocas de más antigua a más jóvenes que afloran en el área estudiada son: Rocas pórfidicas (andesíticos y dacíticos), rocas postpórfidos (diques básicos y vetas de sulfuros auríferos que intruyen a pórfidos) y por ultimo depósitos recientes o depósitos aluviales y coluviales antrópicos. Ver su distribución en la figura 28.

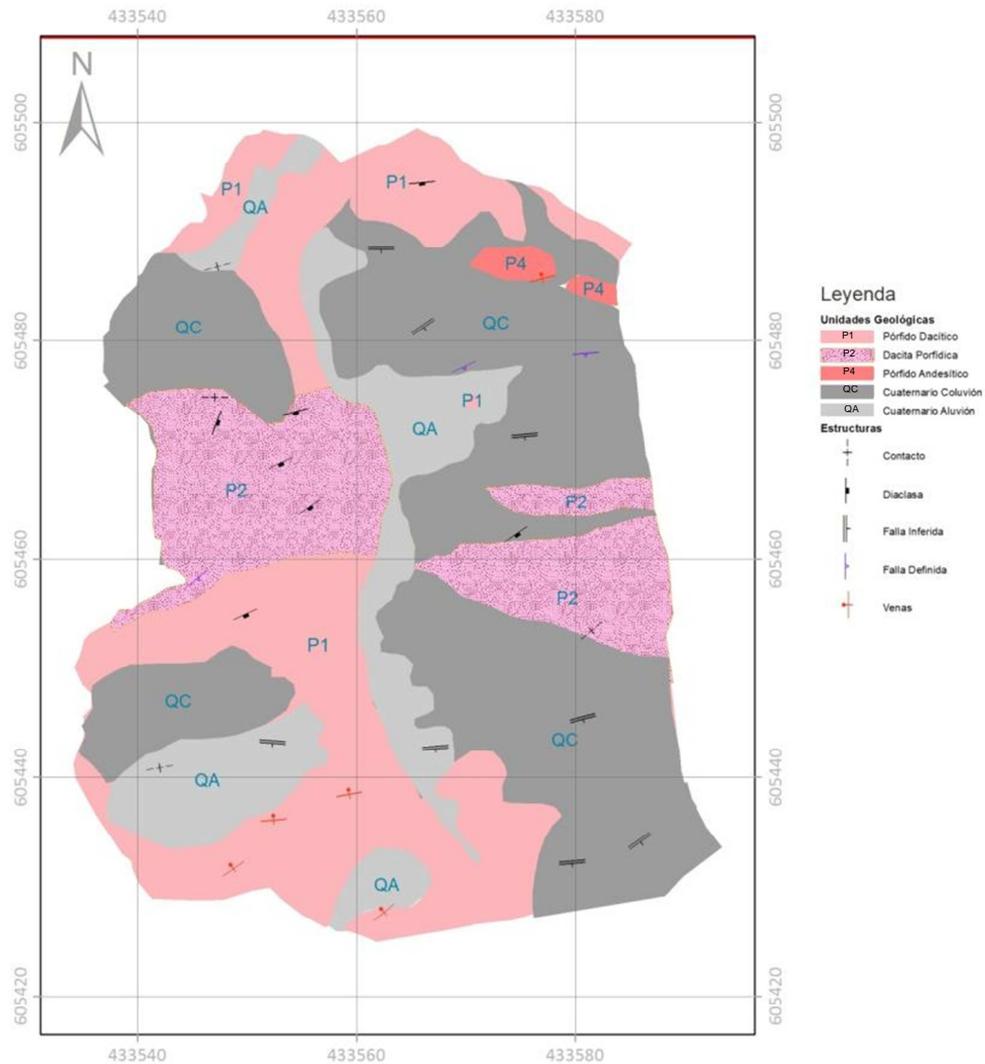


Figura 28. Mapa Geológico Unidades Superficiales.

4.3. Análisis e Integración de la Información.

Para llevar a cabo la determinación de zonas de interés mineral asociados al análisis geológico estructural se identificaron unas variables (geología superficial, aspecto, ángulo de la pendiente, sombras forma de la pendiente-curvatura) y se realizaron mapas temáticos todos en formato Raster menos la geología superficial la cual fue necesaria convertir de Vector a Raster utilizando la herramienta de ArcGis (Conversion Tools/To Raster/Feature To

Raster) para asignarles valores de peso a la litología según predominancia de interés mineral. Luego es necesario realizar una reclasificación con la herramienta de ArcGis (Spatial Analyst Tools/Reclass/Reclassify) asignando valores aceptables y no aceptables según los estudios realizados con anterioridad y lo observado en campo. Una vez obtenidos los mapas reclasificados se realiza la unión para determinar zonas de interés mineral en el Área de Cien Pesos Municipio de Marmato. La selección de la escala de representación cartográfica y modelamiento estuvo regida por la escala de las fuentes de datos del DSM tamaño de pixel = 19.2009 cm.

4.3.1. Capas temáticas

Para integrar la información en SIG ArcGis se deben definir los valores aceptables y no aceptables de reclasificación para el análisis de zonas de interés mineral asociados al análisis geológico estructural desde una perspectiva de análisis de superficie y con base en las apreciaciones y aportes de estudios anteriores de geología estructural con el fin de justificar los valores originales reclasificados en valores aceptables y no aceptables para cada variable utilizada.

4.3.1.1. Geología

Variable cualitativa, en este caso según (Ortiz, 2010) y (Scott E, Wilson Consulting Inc, 2009) determinaron mediante pruebas de laboratorio y trabajo de campo que las unidades geológicas con presencia de estructuras de interés mineral son las rocas porfídicas (P1, P2 Y P4). Los depósitos recientes aluviales y coluviales no presentan estructuras de interés mineral donde se asignaron los valores de aceptables y no aceptables según la tabla 7. La figura 29 representa las zonas más oscuras con posibilidad de presencia de estructuras de interés mineral y las más claras como las zonas no aptas.

Valor Original	Reclasificación Aceptable=1, no Aceptable=0
-----------------------	----------------------------------------------------------

Unidades Geológicas			
P1	Pórfido Dacítico	P1	= 1
P2	Dacita Porfídica	P2	= 1
P4	Pórfido Andesítico	P4	= 1
QC	Cuaternario Coluvión	QC	= 0
QA	Cuaternario Aluvión	QA	= 0

Tabla 7. Unidades Geológicas y reclasificación.

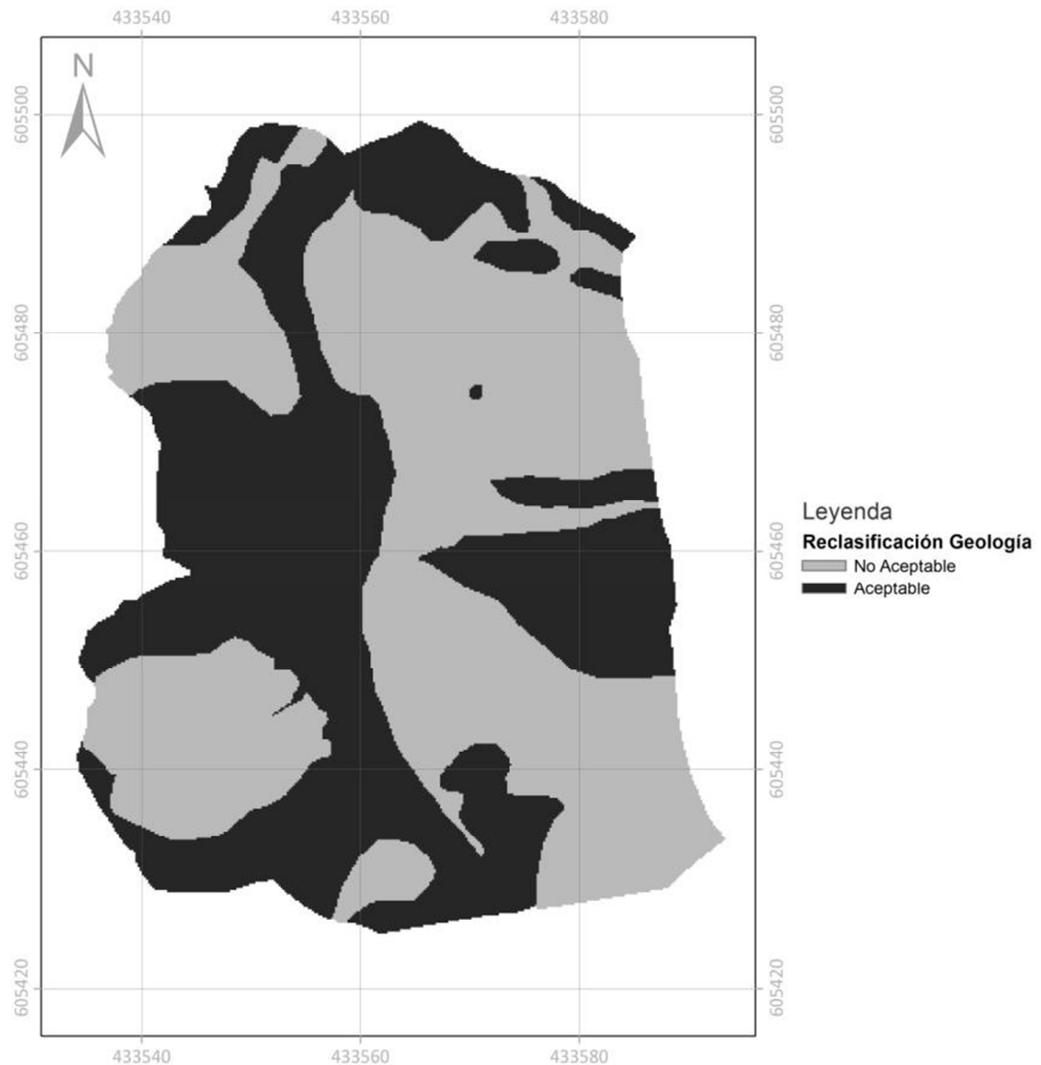


Figura 29. Mapa reclasificado Unidades Geológicas.

4.3.1.2. Aspecto

Las fallas y diaclasas pueden generar estructuras planares de superficie muy marcadas y con tendencia que se observan en superficie. Según (Consulting,

Telluris, 2010) determino que los planos de falla y diaclasas que presentan interés mineral corresponden a las zonas donde la pendiente desciende hacia el norte, sureste, oeste y noreste. Se asignaron los valores de aceptables y no aceptables según la tabla 8. El mapa de la figura muestra las zonas oscuras como aceptables y las claras como no aceptables.

Valor Original	Reclasificación Aceptable=1, no Aceptable=0
<p>Orientación de la Pendiente</p> <ul style="list-style-type: none"> Flat (-1) North (0-22.5) Northeast (22.5-67.5) East (67.5-112.5) Southeast (112.5-157.5) South (157.5-202.5) Southwest (202.5-247.5) West (247.5-292.5) Northwest (292.5-337.5) North (337.5-360) 	<ul style="list-style-type: none"> Flat = 0 North = 1 Northeast = 0 East = 0 Southeast = 1 South = 0 Southwest = 0 West = 1 Northwest = 1 North = 0

Tabla 8. Aspecto – Orientación de la Pendiente reclasificación.

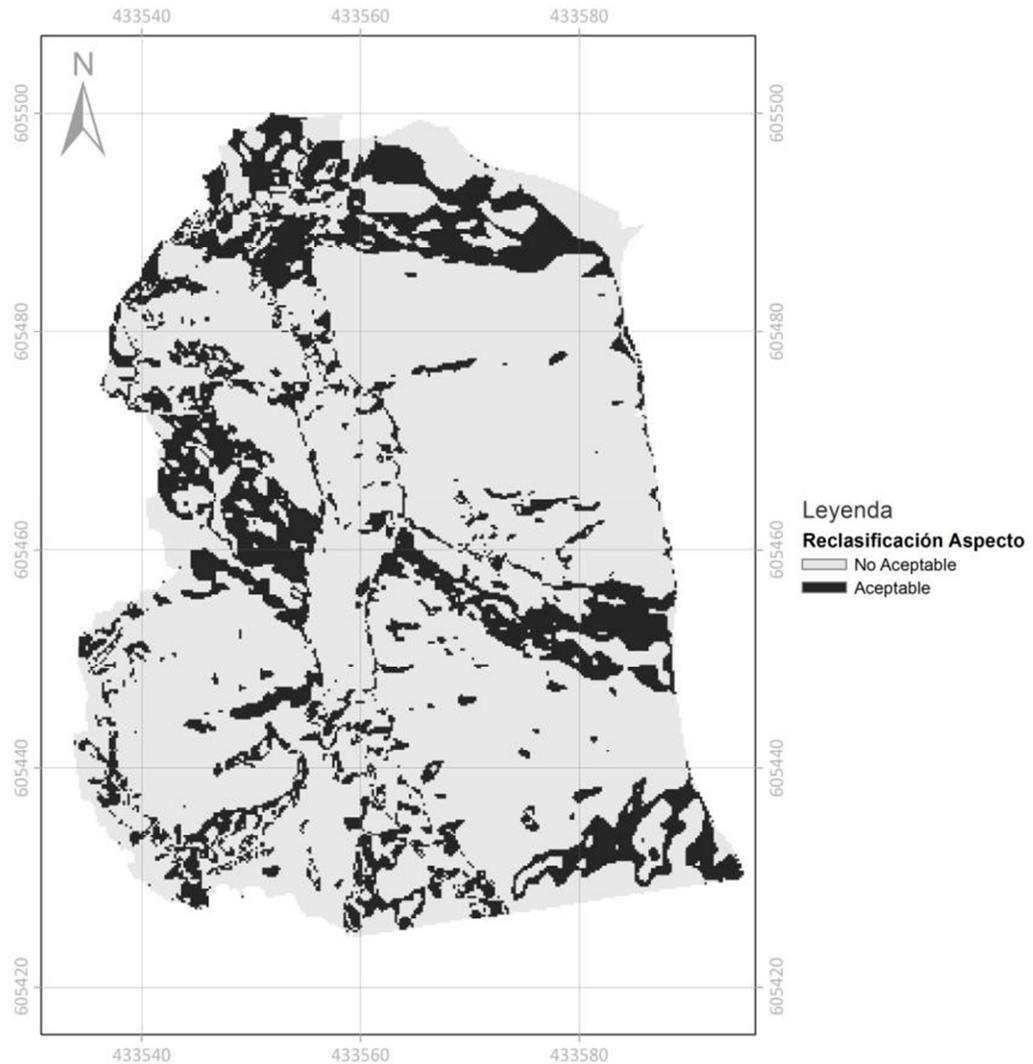


Figura 30. Mapa reclasificación Aspecto – Orientación de la Pendiente.

4.3.1.3. Pendiente

De las observaciones en campo y medida de planos de falla y planos de diaclasas según la tabla 6 donde se midieron planos de inclinación en el muestreo de superficie se observó que las pendientes $\geq 9\%$ corresponden a las estructuras de interés mineral la figura 31 muestra las zonas oscuras como aceptables y las claras como no aceptables que corresponden a los valores de pendiente $< 9\%$. Se asignaron los valores de aceptables y no aceptables según la tabla 9.

Valor Original	Reclasificación Aceptable=1, no Aceptable=0
<p>% Pendiente</p> <p> 0 - 5%</p> <p> 5.01% - 9%</p> <p> 9.01% - 16%</p> <p> 16.01% - 26%</p> <p> >26%</p>	<p>Si % Pendiente \geq 9, aceptable=1</p> <p>Si % Pendiente $<$ 9, no aceptable=0</p>

Tabla 9. % de la Pendiente reclasificación.

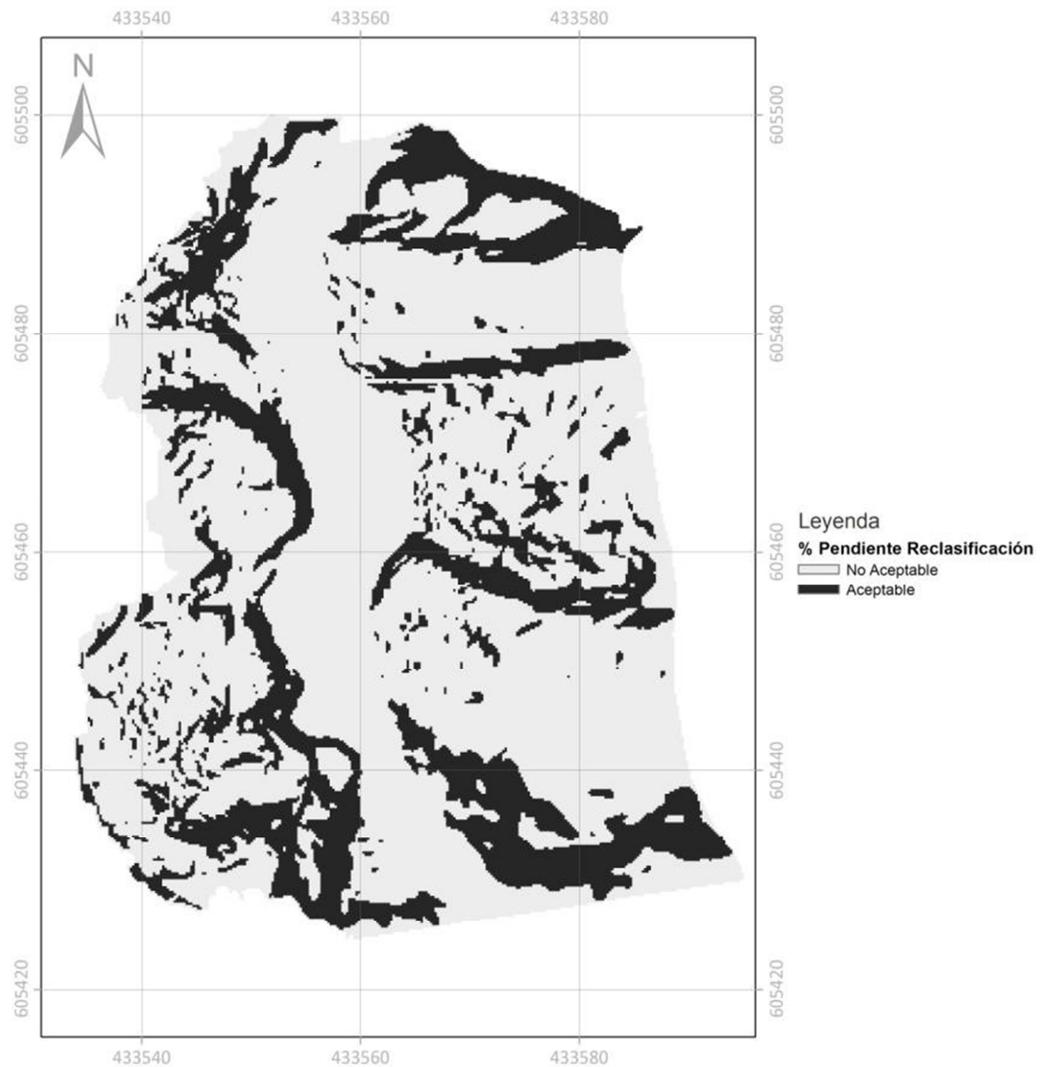


Figura 31. Mapa reclasificación % de la Pendiente.

4.3.1.4. Sombras (Hillshade)

El análisis de sombras resalta las estructuras en dirección N-W y S-E que según en el estudio de análisis estructural regional realizado por (Consulting, Telluris, 2010) corresponden a zonas de interés mineral estas estructuras en la superficie sobresalen con un azimut=45° y una inclinación=45° y corresponden a las zonas oscuras en el modelo de superficie de sombras (Hillshade) de la figura 19 f). Se idéntico que los valores <28 corresponden a las zonas con rasgos estructurales de interés mineral. La reclasificación en la figura 32 muestra las zonas oscuras como aceptables y las claras como no aceptables. Se asignaron los valores de aceptables y no aceptables según la tabla 10.

Tabla 10. Sombras (Hillshade) reclasificación.

Valor Original	Reclasificación Aceptable=1, no Aceptable=0
<p data-bbox="516 982 732 1010">Sombras az=45 incli=45</p> <p data-bbox="607 1020 695 1045">High : 180</p>  <p data-bbox="607 1073 672 1098">Low : 0</p>	<p data-bbox="932 989 1377 1020">Si valores sombra <=28, aceptable=1</p> <p data-bbox="915 1066 1393 1098">Si valores sombra >28, no aceptable=0</p>

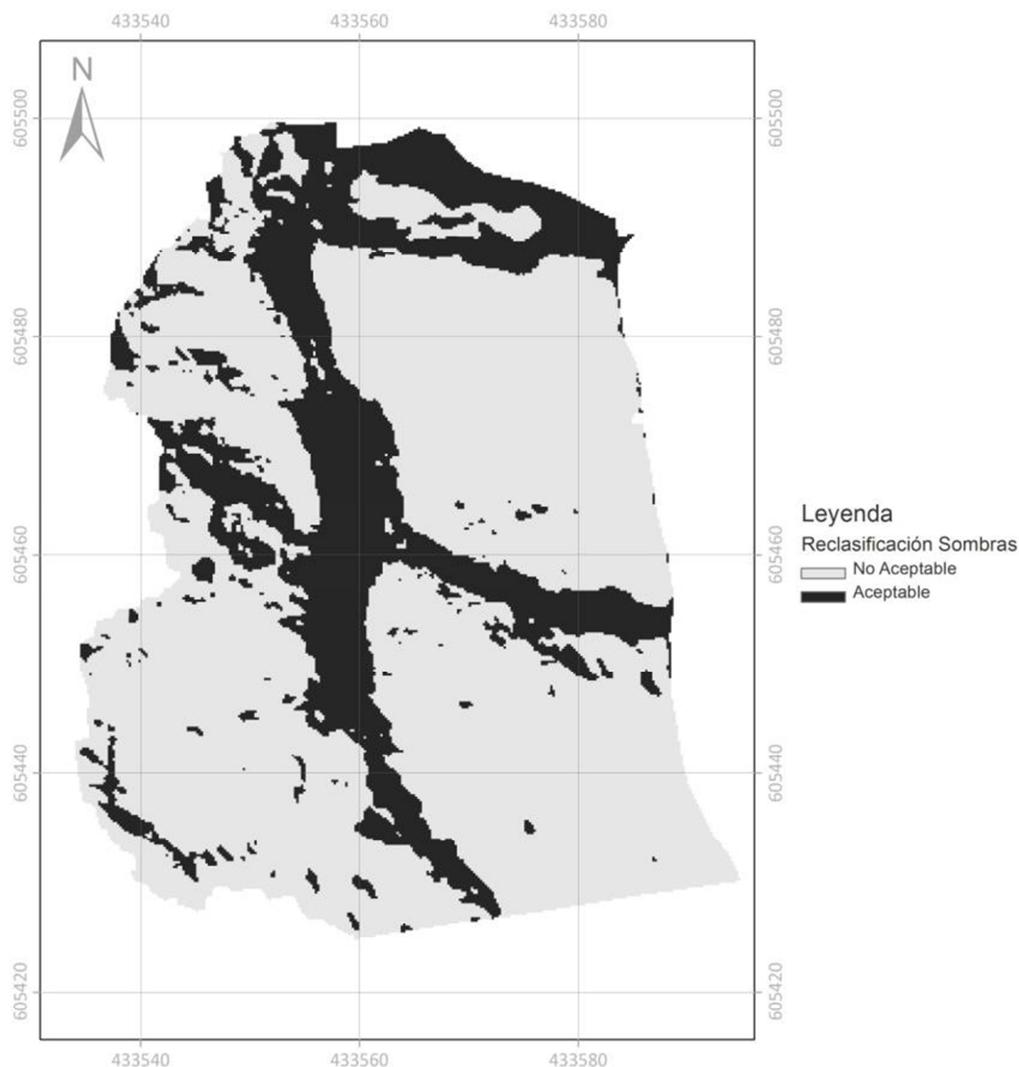


Figura 32. Mapa reclasificación de Sombras (Hillshade).

4.3.1.5. Forma de la pendiente (Curvatura)

En el análisis estructural de superficie la dirección de máxima pendiente (curvatura de Perfil) y la dirección perpendicular a la máxima pendiente (Curvatura Planar) tienen gran significado en el análisis estructural por que determinan zonas de interés geomorfológico estas estructuras en la superficie corresponden a las zonas oscuras con valores <0 para del modelo de superficie del mapa de curvatura figura 20 a), b) y c). La reclasificación en la figura 33 muestra las zonas oscuras como aceptables y las claras como no

aceptables Se asignaron los valores de aceptables y no aceptables según la tabla 11.

Tabla 11. Forma de la pendiente (Curvatura) reclasificación.

Valor Original	Reclasificación Aceptable=1, no Aceptable=0
Curvatura High : 8.7551e+013  Low : -8.06342e+013	Si valores curvatura<0, aceptable=1 Si valores curvatura >=0, no aceptable=0
Curvatura de Perfil High : 4.91444e+013  Low : -5.17675e+013	Si valores curvatura perfil<0, aceptable=1 Si valores curvatura perfil>=0, no aceptable=0
Curvatura Planar High : 4.35119e+013  Low : -4.11924e+013	Si valores curvatura planar<0, aceptable=1 Si valores curvatura planar>=0, no aceptable=0

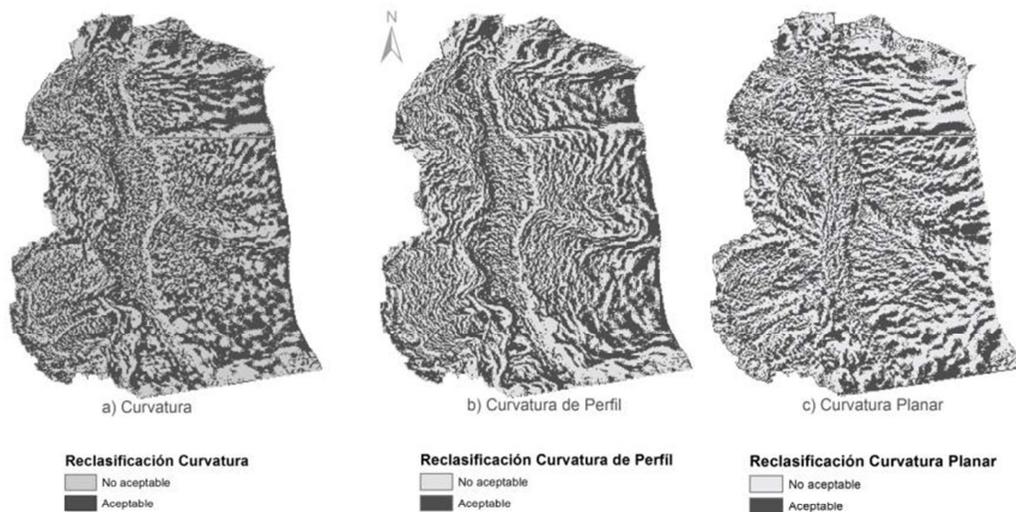


Figura 33. Mapa reclasificación de Curvatura.

4.3.2. Algebra de mapas

Los mapas reclasificados de acuerdo a las tablas 7 a 11 en el análisis son combinados utilizando la unión con la herramienta (&) de Arcgis (Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calcular) para obtener el mapa de zonas de interés mineral asociados al análisis de superficie y geológico estructural. El mapa de la figura 34 muestra como las zonas en rojo corresponden a las zonas con presencia de estructuras con rasgos geológicos estructurales y de superficie idóneos para zonas de interés mineral. El nivel de detalle suministrado por el DSM sirven para hacer una aproximación a una escala de detalle identificando pequeñas zonas en rojo de interés mineral que en superficie afloran en pocas partes pero según el muestreo de superficie donde se logro medir la dirección e inclinación de las estructuras y según estudios realizados por (Ortiz, 2010) estas estructuras pueden llegar profundidades de hasta 200 metros con un potencial alto de interés mineral para la explotación de Oro.

Los resultados obtenidos según el muestreo de superficie y DSM de gran detalle justifican que se realice un proyecto de exploración con pozos siguiendo la inclinación y dirección de las estructuras identificadas.

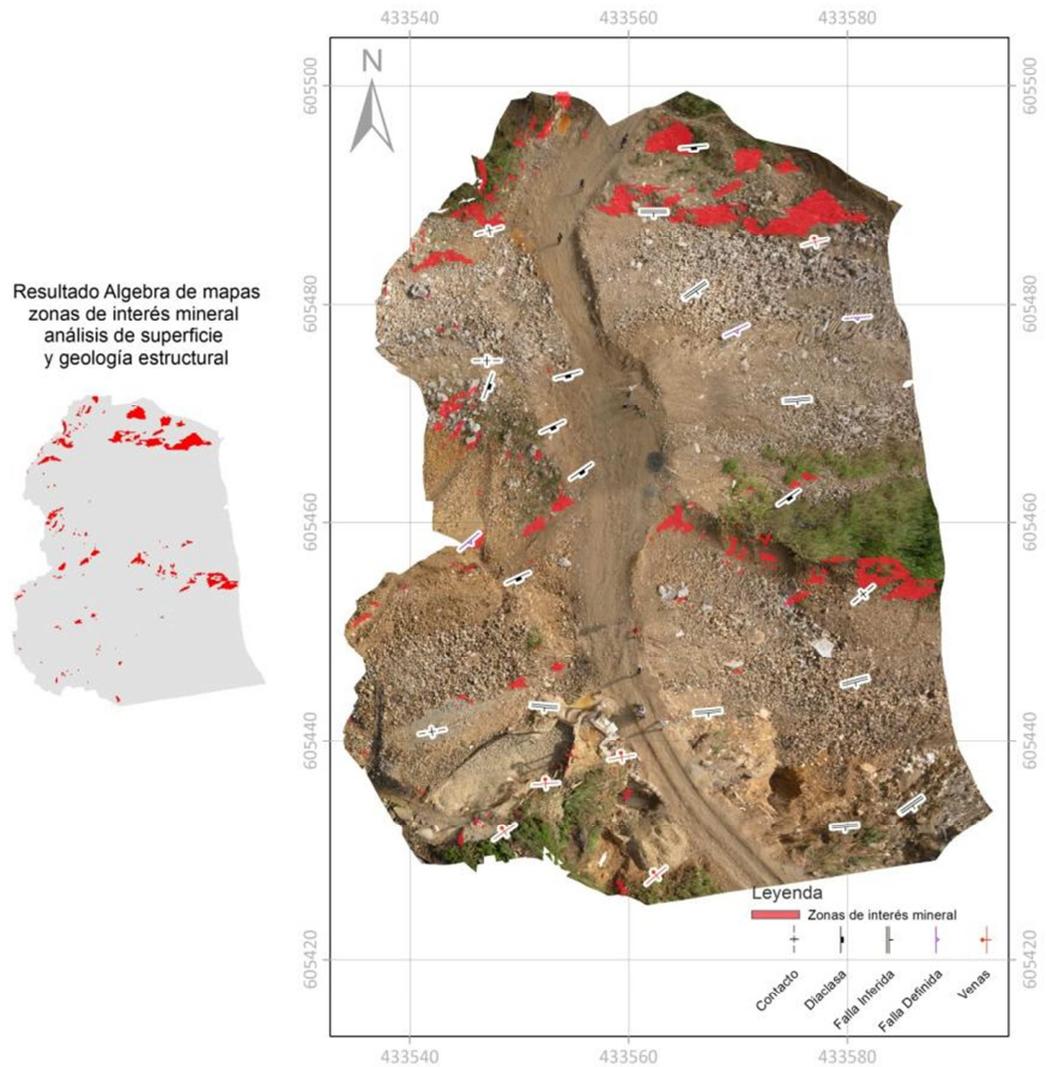


Figura 34. Mapa de zonas de interés mineral análisis de superficie y geología estructural Cien Pesos Marmato- Colombia.

5. CONCLUSIONES

El estudio demuestra que mediante una plataforma de globos de Helio, una cámara digital, un levantamiento de puntos de control PCT y un software especializado (libre o licenciado) es viable la obtención de modelos de superficie DSM de alta precisión (pixel=0.19 m) de precisión para el Raster a muy bajo costo. Muy practico para el estudio de pequeñas áreas <2ha.

Se tiene como limitación el control de los globos de helio que están sujetos a las condiciones atmosféricas.

Existe muy buena correlación en el modelo de superficie generado con software libre y licenciado pero el software libre es muy limitado en el volumen de imágenes a analizar y presenta inestabilidad en algunos procesos además que el software libre no proporciona herramientas para la calibración de las imágenes y no permiten la georeferenciación de las imágenes.

Mediante la superposición del análisis de superficie y características geológicas estructurales de interés, se ha permitido determinar aquellas zonas que se consideran del máximo potencial para contener un yacimiento minero de interés económico.

La información geológica (estructural) y el análisis espacial del modelo de superficie de alta precisión son una importante herramienta de prospección minera para esta área, ya que permite localizar tendencias de estructuras geológicas que se encuentran asociados a mineralizaciones de interés económico; esto, correlacionado con los datos geoquímicos y geológicos sugiere que estas tendencias estructurales deben tomarse en cuenta como blancos de futuras exploraciones en el área.

El consumo de Hardware es un factor importante para los dos software licenciado o libre dependiendo del número de imágenes a procesar consume mucho recurso y se vuelven muy lento el análisis lo que con lleva al bloqueo por lo que es necesario trabajar en subzonas aumentando el procesamiento de imágenes.

La ortofo obtenida con el software licenciado de Agisoft PhotoScan de una forma rápida es una herramienta muy eficaz que permite realizar mediciones con precisión milimétrica muy importante desde el punto de vista visual en el plano (x,y) donde se obtuvo un tamaño de pixel $\approx 4\text{mm}$.

El micro DSM obtenido permite tener un acercamiento mucho más preciso espacialmente a las características físicas del relieve terrestre con el análisis de pendiente, orientación, altitud, curvatura. Al estar modelizadas se puede realizar estudios y medidas de detalle sin necesidad de ir a campo.

6. RECOMENDACIONES

Se sugiere un análisis con más PCT puntos de control levantados con estación total para aumentar la precisión del Modelo de superficie generado.

El control de la plataforma es muy importante por lo que se recomienda la evaluación de plataformas UAV autónomas en el vuelo (piloto automático) mediante el vuelo por puntos de control en aire (Eisenbeiß, 2009). También mejorar las características en la cámara lentes y resolución de pixel para garantizar la optimización en la toma de las fotografías, alcanzar altura y poder ampliar la zona de estudio y resolución que se ven reflejados en el producto final DSM.

Comparar esta metodología de obtención de MDS con la LIDAR (laser escáner) en cuanto a precisión, procesamiento de imágenes y costos.

Evaluar otros métodos de interpolación determinística (IDW, Spline, Natural Neighbor, Trend) con la nubes de puntos para la obtención de superficies topográficamente mas correctas y comparar los resultados con la interpolación topo to Raster de ArcGis.

Implementar una metodología para calcular DTM Modelos Digital de Terreno eliminando el ruido generado por la vegetación y construcciones mediante el análisis de la nube de puntos.

Implementar la obtención de MDS para túnel de mina (Underground) sin una plataforma UAV mediante la toma de fotografías en tierra.

Realizar otro tipo de análisis en al algebra de mapas para la integración de la información y comparar con los resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Agisoft. (2012a). *PhotoScan*. Recuperado el 20 de septiembre de 2011, de <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/professional/>
- Agisoft. (2012b). *Lens*. Recuperado el 20 de diciembre de 2011, de <http://www.agisoft.ru/products/lens/>
- Alias, N. A., Zulkepli, M., & Setan, H. (2010). Camera Configuration For Accurate Craniofacial Mapping Using Photomodeler. *Geoinformatic Science Journal*, 10(1), 61-72.
- Bendea, H., Chiabrando, F., Tonolo, F., & Marenchino, D. (2008). *Mapping Of Archaeological Areas Using A Low-Cost UAV The Augusta Bagiennorum Test Site*. Torino: Politecnico di Torino DITAG.
- Binarymillenium. (2008). *Photosynth Export Process Tutorial*. Recuperado el 6 de Marzo de 2011, de <http://binarymillenium.com/2008/08/photosynth-export-process-tutorial.html>
- Consulting, Telluris. (2010). *Structural Study of Structural Study of District, Colombia*. Telluris Consulting Ltd., Brackendale.
- Dowling, T. e. (2009). *Very hig resolution DEM acquisition at low cost using a digital camera and free software The 18th World IMACS/MODSIM09 Congress*. Recuperado el 3 de Marzo de 2011, de <http://www.mssanz.org.au/modsim09/F13/dowling.pdf>
- Eisenbeiß, H. (2009). *UAV Photogrammetry*. Zürich.
- Fux, P. (2006). Das Petroglyphen-Projekt « Chichictara » in Palpa , Peru Feldarbeiten im Jahr 2006 und Ausblick. (U. Zürich, Ed.) *Obsidian Black Literature In Review*, 189-205.
- Gischig, V. e. (2011). Composite rock slope kinematics at the current Randa instability, Switzerland, based on remote sensing and numerical modeling. *Engineering Geology*, 118(1-2), 37-53.

- Hakala, T. e. (2010). Acquisition of Bidirectional Reflectance Factor Dataset Using a Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Consumer CameraRemote Sensing. *Remote Sensing* 2.3, 819-832.
- Hunt, D. (9 de Agosto de 2002). *KAPER E-Magazine*. Recuperado el 15 de Enero de 2012, de http://www.kaper.us/basics/BASICS_picavet.html
- Illsley, P. (2011). *Kite and Balloon Aerial Imaging*. Recuperado el 23 de Enero de 2012, de <http://www.paulillsley.com/airphoto/systems/balloons-kites.html>
- Illsley, P. (s.f.). *Kite and Balloon Aerial Imaging*. Recuperado el 23 de Enero de 2012, de <http://www.paulillsley.com/airphoto/systems/balloons-kites.html>
- JAG3D. (2011). *Java Graticule 3D*. Obtenido de <http://javagraticule3d.sourceforge.net/>
- James S. Aber, I. M. (2010). *Small-Format Aerial Photography: Principles, techniques and geoscience applications*. Amsterdam: Elsevier B.V. Firts Edi.
- Karauğuz, G., Çorumluoğlu, Ö., Kalaycı, İ., & Asri, İ. (2009). 3D Photogrammetric model of Eflatunpınar monument at the age of Hittite empire in Anatolia. *Journal of Cultural Heritage*, 10(2), 269-274.
- Mach, L. (2012). *Insight3d. Open Source image based 3D modelling software*. Recuperado el 20 de junio de 2011, de <http://insight3d.sourceforge.net/>
- Mach, L. (2012). *Open Source image based 3D modelling software*. Recuperado el 20 de junio de 2011, de <http://insight3d.sourceforge.net/>
- Markaeology. (30 de Diciembre de 2010). *How to create a Digital Elevation Model from Photosynth point clouds*. Recuperado el 5 de Enero de 2011, de <http://palentier.blogspot.com/>
- MeshLab. (2011). Obtenido de processing and editing of unstructured 3D triangular meshes: <http://meshlab.sourceforge.net/>

- Mora, R., & Céspedes, M. (2010). Fotogrametría Y Nube De Puntos Aplicado En La Documentación del Patrimonio Construido. El Caso de La Torre De La CalaHorra en Elche. *X Congreso Internacional Expresión Gráfica aplicada a la Edificación APEGA*, 379-387.
- Ortiz, H. (2010). *Concesiones Mineros Nacionales Marmato*. Medoro reporte interno.
- Photomodeler. (s.f.). *Measuring & Modeling the Real World*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2011, de <http://www.photomodeler.com/>
- Photosynth, M. (2011). *Capture your world in 3D*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2011, de <http://photosynth.net/>
- ScanView. (2011). *MenciSoftware*. Obtenido de http://www.menci.com/index.php?option=com_phocadownload&view=file&id=17:scanview
- Scott E, Wilson Consulting Inc. (2009). *Technical Report Colombia Goldfields Ltd. Medoro Resources Ltd. Marmato Project, Zona Alta Property Department of Caldas. Republic of Colombia*. Obtenido de http://www.medororesources.com/site/ywd_medororesources/assets/pdf/Marmato_Project__NI_43-101_Technical_Report_5_March_2010.pdf
- University of Pisa, D. d. (2011). *Meshlab 3D mesh processing software system*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2011, de <http://meshlab.sourceforge.net/>
- Verhoeven, G. (2011). Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photostan. *Archaeological Prospection*, 18(1), 67-73.