

## **APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA, MEDIANTE EL USO DE UAV.**

**Andrés Soto Reyes<sup>1</sup>, E. Muñoz Ortiz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería, Alonso de Ribera 2850, Concepción, Chile.  
[aisoto@ing.ucsc.cl](mailto:aisoto@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, [emunozo@ucsc.cl](mailto:emunozo@ucsc.cl)

### **Resumen**

En la actualidad el mundo atraviesa por distintos cambios, el creciente avance de las innovaciones tecnológicas, comunicaciones más rápidas, más efectivas y la virtualización de procesos físicos, crea una nueva gama de herramientas a disposición de los usuarios. La ingeniería civil no se ha hecho ajena al uso de los nuevos recursos tecnológicos, uno de estos es la implementación de la fotogrametría aérea, la cual se define como una técnica cuyo objetivo es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de objetos físicos y su entorno, a través de la interpretación de múltiples imágenes aéreas. Este estudio busca caracterizar la geometría distintas estructuras ubicadas dentro de las dependencias de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC), a través de la aplicación del método de fotogrametría aérea. El área de estudio comprende una superficie de aproximadamente 10 hectáreas, las cuales fueron sobrevoladas por un drone, este tiene incorporado una cámara fotográfica la cual se encarga de capturar las imágenes aéreas. Al mismo tiempo se comprueba la calidad de precisión de este método y las distintas aplicaciones prácticas que se pueden derivar de este método topográfico.

### **Introducción**

Los avances tecnológicos están orientados a reducir los riesgos del operario o del elemento humano, optimizar procesos (reducir tiempos de trabajo) y minimizar costos a largo plazo. Dichos avances han permitido el desarrollo y la adaptación de nuevos equipos y métodos de medición.

Sobre todo, se ha hecho frecuente el uso de los sistemas de posicionamiento por satélite. Lo anterior y que los vehículos aéreos no tripulados o *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) se han vuelto cada vez más confiables, fáciles de usar, ligeros y con un menor costo, permitiendo que en la actualidad la toma de información en el campo sea cada vez más fácil, segura y genere resultados de información geoespacial de alta calidad (Colomina, 2014), así esta recolección masiva de información permite representar en los planos situaciones más fidedignas de un terreno.

Cada técnica y aparato tiene sus limitantes en el campo y su uso está determinado por las condiciones físicas del terreno y las necesidades del proyecto. Dichas necesidades están relacionadas con el alcance del proyecto, con el tiempo disponible para realizar el estudio con el nivel de precisión exigido y los recursos económicos disponibles.

El uso de vehículos aéreos no tripulados permite la toma de fotografías aéreas que sirven para la creación de modelos digitales de terrenos y la representación cartográfica de estos. Este progreso en la forma de obtener fotografías aéreas, sumando al desarrollo de los programas informáticos, permite que la fotogrametría, técnica utilizada desde hace algunas décadas, se adapte a la era digital y facilite el trabajo del ingeniero civil.

Este trabajo estudia la generación digital y caracterización de estructuras, mediante la aplicación de fotogrametría aérea a través del uso de vehículos aéreos no tripulados. En el estudio se realiza un

vuelo fotogramétrico con un dron en el campus San Andrés de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, como ejemplo práctico, además de realizar el procesamiento de la información y generar una representación digital del campus.


## Equipamiento y Métodos

### Equipos

Se utilizó el modelo de UAV HEXA-01 (Tabla 1), el cual corresponde a un dron con una estructura de 7 cuerpos, equipado con un sistema de radio frecuencias de onda corta (2.4 GHz) y un sistema de posicionamiento global (GPS). El control de la nave se proporciona desde una estación de control en terreno (computador portátil) dirigido por telemetría de largo alcance (hasta 10km), donde simultáneamente el receptor registra los eventos del obturador de la cámara y almacena la información durante el vuelo en una tarjeta SD. El sensor dentro del HEXA-01 corresponde a una cámara réflex Sony QX1 de 20 Megapíxeles el cual esta acoplado a lentes Carl Zeiss para proveer de una mejor distancia de muestreo de terreno o *Ground Sampling Distance* (GSD). El dron despega de manera manual o automática y su aterrizaje es mediante descenso asistido.

*Tabla 1. Especificaciones técnicas modelo UAV.*

<b>Hexa-01</b>	
<b>Diametro</b>	<b>120cm</b>
<b>Motores</b>	<b>6</b>
<b>MTOW</b>	<b>6 kg</b>
<b>Velocidad operación</b>	<b>35km/h</b>
<b>Autonomia</b>	<b>25min</b>



Para la virtualización del modelo es necesaria la georreferenciación de este mediante puntos ubicados en el terreno, por lo cual es necesario la utilización de un equipo de levantamiento terrestre GPS diferencial. El cual introduce una mayor exactitud. Este tipo de receptor, además de recibir y procesar la información de los satélites, recibe y procesa, simultáneamente, otra información adicional procedente de una estación terrestre ubicada en un lugar cercano y reconocido por el receptor. Esta información complementaria permite corregir las inexactitudes que se puedan introducir en las señales que el receptor recibe de los satélites. En este estudio se utilizó un equipo EPOCH (en modo de trabajo RTK), El equipo está compuesto de un receptor base, un receptor móvil, el colector de datos y los accesorios.

La técnica de posicionamiento RTK se basa en que la estación terrestre transmite al receptor GPS los ajustes que son necesarios realizar en todo momento (en tiempo real), éste los contrasta con su propia información y realiza las correcciones mostrando en su pantalla los datos correctos con una gran exactitud que llega a un nivel milimétrico.

## Metodología

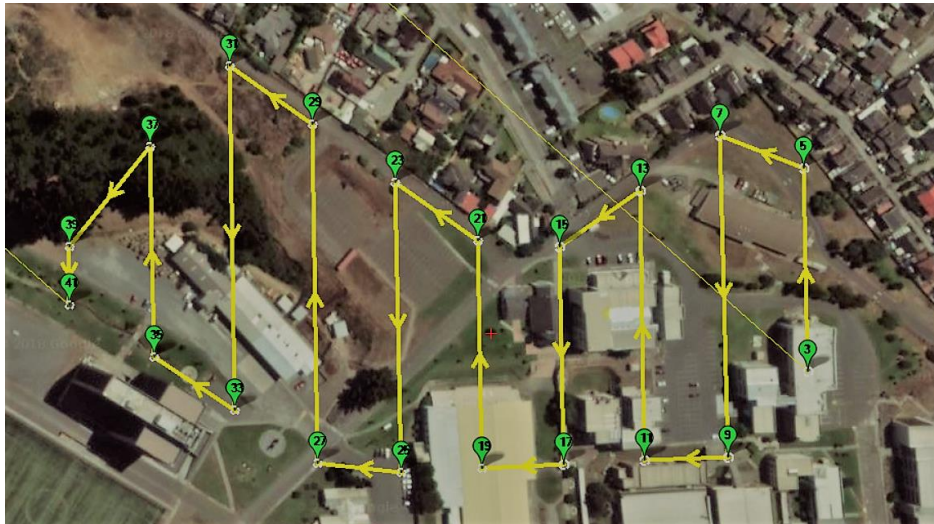
El proceso de aerofotogrametría se realizó dentro de las dependencias de la Universidad Católica de la Santísima Concepción(UCSC). El flujo de trabajo está dado por los siguientes subtemas:

### -Definición de plan de vuelo.

Para el levantamiento con dispositivo UAV se programó un vuelo a una altitud de 60 metros desde la base de despegue.

Ya que el dron vuela a una velocidad crucero de 35 km/h se programa un traslape de imágenes del 80%, siguiendo las recomendaciones de súper posicionamiento (Haala, 2013).

El plan de vuelo se realizó con el software UAS Chile, donde según las condiciones del área y teniendo en cuenta la autonomía del modelo UAV, se traza una ruta óptima, la cual, al momento de tomar registro fotográfico, el dispositivo debe cubrir todo el terreno de estudio, el plan de vuelo se encuentra definido en la Figura n°1. De abarcar un área demasiado grande, ésta se divide en sectores que se encuentren al alcance de la autonomía del vehículo aéreo.



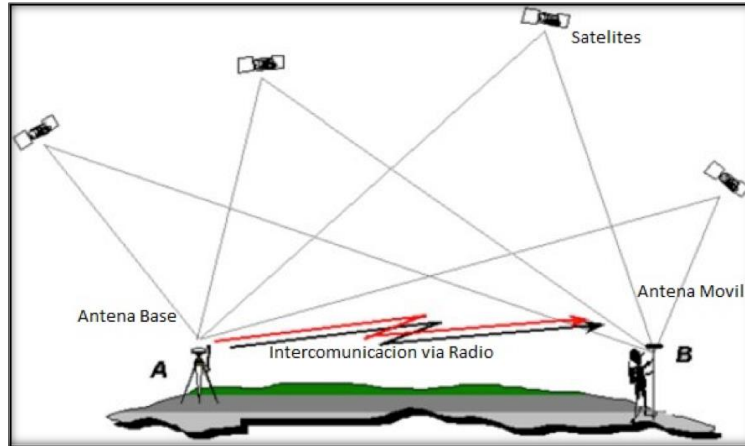
*Figura n°1. Plan de vuelo.*

### -Recolección de puntos de Control.

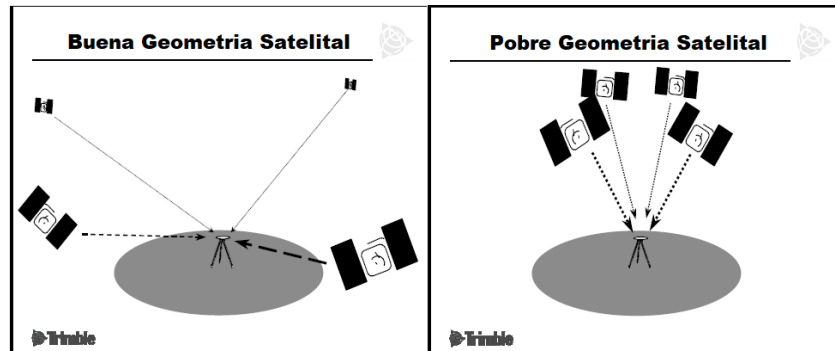
En el proceso de recolección de puntos de control la ubicación de la estación base forma parte fundamental en la medición, la cual se encarga de hacer correcciones en tiempo real(RTK) al receptor de ubicación móvil y así disminuir el error de medición. La estación GPS base se ubicó en un terreno abierto dentro del área de estudio, esto para evitar en lo posible la obstrucción con algún objeto o estructura la intercomunicación por radio que existe entre la base y el móvil (Figura n°2), lo que puede generar que alguna medición tenga un resultado del tipo flotante. Existen dos tipos de soluciones cinemáticas, fijas y flotantes.

Una solución flotante es una estimación inicial a las ambigüedades registradas en la medición, en este estado el móvil está creando una rejilla alrededor de sí mismo y pasando por todas las posibles soluciones siguiendo una serie de criterios estadísticos para intentar fijar la solución. Cuando una solución es fija trae la incertidumbre a un nivel de centímetro, que difiere el nivel decímetro de un

estado flotante. La geometría satelital juega un rol importante para evitar soluciones flotantes, debe existir una buena distribución de satélites en el espacio, como evitar que en las mediciones estos se encuentren en línea o directamente agrupados por encima del receptor (Figura n°3), para esto se necesita de un mínimo de 5 satélites (Trimble, 2003). 6 o más son necesarios para una mejor solución fija.



**Figura n°2.** Ejemplo de comunicación con estación base (Fuente: Tecnoceano).



**Figura n°3.** Diferencia de posicionamiento satelital. (fuente: Trimble, 2003)

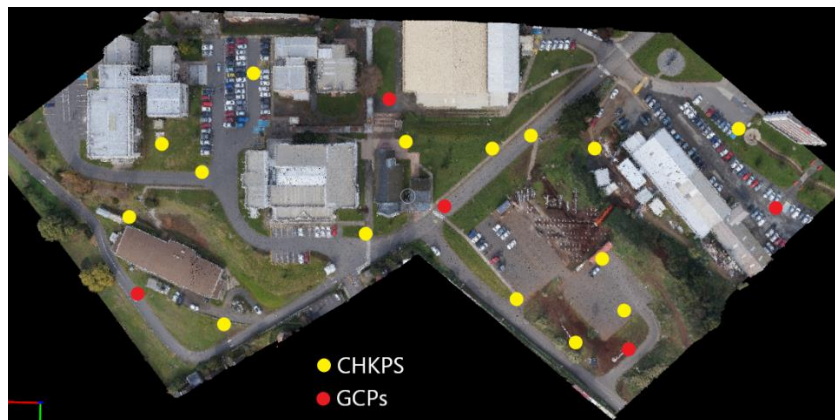
Los puntos de control se dividen o clasifican como puntos de control de terreno (GCP) o *check points* (CKP). Los CKP a diferencia de los GCP se utilizan para la georreferenciación del modelo y evaluar la precisión absoluta de este, en dónde las coordenadas de estos puntos son comparadas con la del mismo punto medido en el modelo fotogramétrico. Los GCP se encargan de ajustar el modelo a las coordenadas medidas en estos y así aumentar la precisión absoluta. Los GCP se deben repartir de manera homogénea en el área de interés, se recomienda un número mínimo de 5 GCP. De 5 a 10 GCP suele ser suficiente, incluso para proyectos de gran escala, más GCP no contribuyen significativamente a un aumento de precisión. Se recomienda ubicar los GCP por los bordes del terreno y siempre uno en el centro de este, así se disminuirá el error de medición a cerca de un 90% (Chen, 2017).

Los puntos de control se ubican en superficies visibles y que sean reconocibles desde el aire, tales como tapas de alcantarilla, señaléticas en el asfalto, esquina de bermas, etc. (Figura n°4). Para cada punto de control existe una medición independiente con un receptor GPS que tomará correcciones en RTK de la estación base. Se identificaron 20 puntos distribuidos en la zona del proyecto, de los cuales

5 de estos se designaron a GCP y 15 puntos a CKP (Figura n° 5).



*Figura n° 4. Ejemplo medición de puntos de control (Fuente: Compassdata).*



*Figura n° 5. Distribución puntos de control.*

#### **-Procesamiento de datos y software.**

El proceso fotogramétrico se completa con el Software Pix4Dmapper, el cual es un programa especializado en fotogrametría que permite convertir imágenes en modelos 3D y ortomosaicos 2D georreferenciados, esto con las fotos aéreas tomadas por el UAV. La georreferenciación del modelo se aplicará de forma automática una vez ingresadas las coordenadas de los puntos objetivos o puntos de control. Las coordenadas de los GCPs se comparan con las coordenadas obtenidas en el modelo fotogramétrico, la cual determina su precisión usando el error medio cuadrático o Root Mean Square Error (RMSE) como medida estadística. El RMSE es la medida de error estándar para estimar la precisión geoespacial (Chai, 2014). Este valor representa la desviación estandar muestral de las diferencias entre coordenadas medidas en vuelo y las coordenadas observadas en la medición de los GCPs.

Una vez que se realiza todo el proceso, se puede fabricar el modelo y caracterizar geoméricamente

las distintas estructuras dentro del área de estudio conociendo el nivel de error o precisión absoluta que se encuentra en el modelo fotogramétrico.

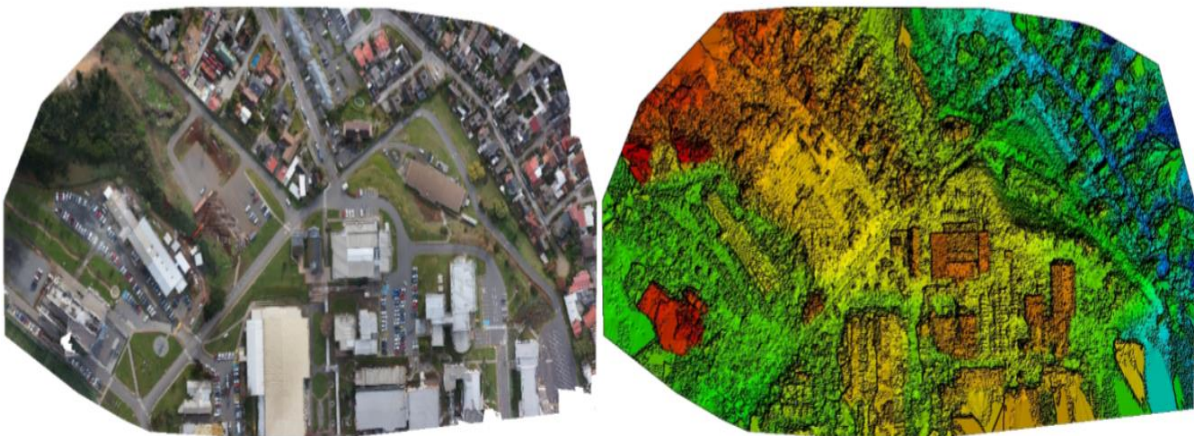
## Resultados y discusión

El vuelo arrojó una cantidad de 171 fotos aéreas, cubrió una superficie de 11.45 hectáreas en total y entregó una distancia promedio de muestreo de suelo o *ground sampling distance (GSD)* de 2.7cm, esto significa que cada pixel en la imagen representa una medida de 2.7cm.

En la etapa de procesamiento de datos se ingresan las imágenes y puntos de control (GCP y CKP) en el software Pix4D para ser procesadas, el cual se encarga de generar el modelo fotogramétrico. La calidad del modelo se puede observar en el reporte de calidad generado por el software, este reporte muestra un resumen de las características del proyecto, vistas preliminares del ortomosaico y el modelo de superficie digital (Figura nº6), y detalles de la calibración y geolocalización de las imágenes, entre otros.

Es importante revisar los resultados mostrados en este reporte, prestando atención a los parámetros del apartado Control de Calidad (Figura nº7), de este se puede observar que se obtienen cuatro verificaciones de color verde y una de advertencia de color amarilla, las que se explican a continuación:

- **Images:** Una marca de verificación verde indica que las imágenes tienen suficiente contenido visual para ser procesadas.
- **Data set:** Una marca de verificación verde indica que más del 95% de las imágenes habilitadas fueron calibradas en un bloque.
- **Camera optimization:** Una marca de verificación verde indica en cámaras con lentes de control de perspectiva que el porcentaje de la diferencia entre la longitud focal inicial y la optimizada es menor que 5%.
- **Matching:** Una marca de verificación verde indica que los resultados son susceptibles a ser de alta calidad en las áreas calibradas.
- **Georeferencing:** Una advertencia en color amarillo indica que se han usado GCPs con un error menor a dos veces la distancia de muestreo del suelo o (GSD) promedio.



*Figura nº 6. Modelo superficie digital y ortomosaico.*

**Quality Check**


🔍 Images	median of 38884 keypoints per image	✅
🔍 Dataset	171 out of 171 images calibrated (100%), all images enabled	✅
🔍 Camera Optimization	0.98% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✅
🔍 Matching	median of 20544.9 matches per calibrated image	✅
🔍 Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.07 m	⚠️

*Figura n° 7. Control de calidad.*

Profundizando en la georreferenciación, se analizan los resultados obtenidos mediante el RMSE para los GCP (Figura n°8). Se observa que en los ejes X e Y no superan los 5cm de error, mientras que en el eje de elevación Z alcanza casi unos 14cm de error, los que da una media de RMSE de 7cm, esto es el error asociado este modelo fotogramétrico.

En relación a los CKP (figura n°9), se observa que las mayores diferencias de mediciones se encuentran en el eje de elevación Z, donde se tiene casos como en el punto 7 y 16 que presentan diferencias mayores a 50cm en comparación con el modelo fotogramétrico.

Para el modelo 3D el software crea una nube de puntos, la cual en primera instancia no permite divisar a simple vista las estructuras que componen la superficie, por lo cual es necesario una densificación de la nube de puntos (Figura n°10) y la creación de una malla 3d texturizada (Figura n° 11), para así tener una perspectiva de las estructuras dentro de la zona y poder identificarlas. La calidad de la nube de puntos se lleva a cabo haciendo una inspección visual de esta y su vez acotando el perímetro del área de estudio, en zonas donde la información no fue suficiente para crear un correcto modelo.

**🔍 Ground Control Points**

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]
PUNTO 3 (3D)	0.020/0.020	0.005	-0.028	0.071	1.333
PUNTO 2 (3D)	0.020/0.020	-0.009	0.036	0.181	3.058
PUNTO 5 (3D)	0.020/0.020	-0.100	-0.033	-0.183	3.764
PUNTO 4 (3D)	0.020/0.020	0.028	-0.055	0.098	0.609
PUNTO 1 (3D)	0.020/0.020	-0.044	0.054	0.122	2.265
<b>Mean [m]</b>		-0.023642	-0.005237	0.057737	
<b>Sigma [m]</b>		0.044722	0.042306	0.125893	
<b>RMS Error [m]</b>		0.050587	0.042629	0.138501	

*Figura n° 8. Imagen tabla resumen RMSE.*

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
PUNTO 15		-0.1687	0.0128	-0.0671	1.0217	4 / 4
PUNTO 19		-0.0080	-0.0555	0.2374	0.8939	3 / 3
PUNTO 14		-0.1798	-0.0002	0.4203	1.6743	3 / 3
PUNTO 13		-0.1842	0.0096	-0.0840	0.9776	4 / 4
PUNTO 12		-0.0587	0.0370	0.0706	0.7860	3 / 3
PUNTO 11		-0.0500	0.0465	-0.0703	0.7958	4 / 4
PUNTO 18		-0.0820	0.0069	-0.2884	1.1150	6 / 6
PUNTO 6		0.0196	0.0116	0.1562	1.6445	3 / 3
PUNTO 17		-0.0758	-0.1009	0.0750	2.4583	3 / 3
PUNTO 16		-0.1262	-0.1952	0.7970	0.8223	3 / 3
PUNTO 7		0.0714	-0.0981	0.6333	4.3462	4 / 4
PUNTO 10		-0.0730	-0.0904	-0.5162	0.8993	5 / 5
PUNTO 9		-0.0610	-0.0439	-0.0261	3.8619	5 / 5
PUNTO 20		-0.0831	-0.0571	-0.2517	2.5135	4 / 4
PUNTO 8		-0.0045	-0.0528	0.0061	3.8079	5 / 5
<b>Mean [m]</b>		-0.070938	-0.037972	0.072795		
<b>Sigma [m]</b>		0.070765	0.062979	0.332153		

*Figura n° 9. Imagen tabla resumen CKP.*



*Figura n° 10. Visualización de la nube de puntos densificada.*



*Figura n° 11. Visualización malla 3D texturizada.*

Dentro del el área abarcada por el modelo, se identificaron diferentes estructuras, tales como los laboratorios de ingeniería y geotecnia, las facultades de ciencias, de ingeniería y la capilla de la universidad. Para ejemplificar una caracterización estructural este artículo se enfocará en la facultad de ingeniería de la UCSC, para ello se aplicó una corrección en la nube de puntos, corrigiendo así ciertas irregularidades geométricas presentadas en la nube de puntos. Estas irregularidades se presentan en sectores con vegetación adyacentes a la estructura, al igual que zonas con ausencia de luz, esto porque el software no encuentra una correcta solución al ser zonas con menor visualización aérea. La corrección se lleva de manera manual, eliminando los puntos que se perciben fuera de los límites de la estructura. En la Figura n°12 se aprecia un notable cambio en la malla 3D antes y después de las correcciones en la nube de puntos, la finalidad de estas correcciones es precisar la información geométrica de la estructura, evitando volúmenes y áreas que no son parte real de esta.

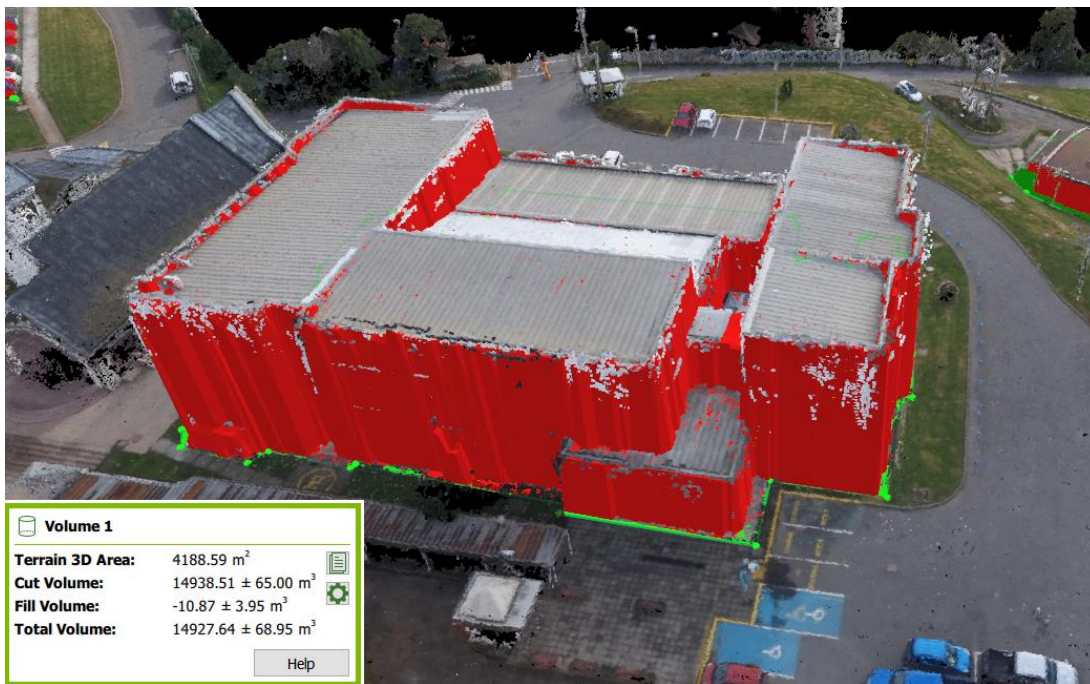


*Figura n° 12. Imagen representando el antes y después de aplicar correcciones en la nube de puntos.*

Con los ajustes hechos anteriormente se puede luego obtener información de carácter geométrico de la estructura.

Con la herramienta de volumen y área se obtiene que la facultad de ingeniería de la UCSC ocupa una superficie de  $4188\text{m}^2$ , lo que se traduce en un 3,6% de toda la superficie digitalizada, su estructura abarca un volumen de aproximadamente  $14927\text{ m}^3$  con un error asociado de  $69\text{m}^3$  como se aprecia en la Figura n° 13. Por lo tanto, se puede así obtener las distintas configuraciones geométricas que presenta cada estructura dentro de esta superficie.

Pix4d ofrece opciones de exportación con salida a distintos formatos para poder seguir editando el modelo digital a la necesidad que el usuario lo necesite.



*Figura n° 13. Imagen de la facultad de ingeniería UCSC junto a su información geométrica.*

## Conclusión

La fotogrametría constituye una técnica que permite obtener datos de la superficie del terreno en un corto lapso de tiempo, mediante la toma de fotografías aéreas con aeronaves de gran envergadura. El uso de las aeronaves no tripuladas (UAV) constituyen una herramienta adecuada para la obtención de estas fotografías, reduciendo el tiempo del trabajo de campo y permitiendo obtener resultados confiables y comparables con otros instrumentos topográficos convencionales, presentando muchas ventajas al campo fotogramétrico y dentro del área de la ingeniería civil.

Al procesar la información adquirida con esta técnica en programas especializados, se puede obtener información topográfica del terreno, facilitando realizar diversas actividades en la planeación de proyectos, ya que sus resultados son entregados de manera digital y a la posibilidad de identificar estructuras reconocibles durante la fotointerpretación.

La técnica planteada establece una metodología accesible, económica y eficaz para instituciones públicas y privadas, con todos los beneficios posibles del uso de la fotogrametría, sabiendo que las mencionadas aeronaves son equipos fáciles de adquirir por la variedad de modelos y marcas presentes en el mercado.

En relación a su aplicación y ejecución, la elección adecuada del número de puntos de control (GCP) a utilizarse en el proyecto y la correcta ubicación de los mismos, permite obtener un modelo digital de terreno más preciso y mejores resultados en la georreferenciación del proyecto, permitiendo escalarlo y trasladarlo a su verdadera posición en el espacio reduciendo el error de la geolocalización de las imágenes.

Siendo que, en el flujo de trabajo fotogramétrico se necesita del apoyo terrestre para mejorar los resultados, el uso de aparatos topográficos para la etapa de apoyo terrestre como GPS, estación total u otros utilizados, se convierte en un complemento de la técnica. Por lo que la metodología estudiada no constituye una solución definitiva a la necesidad de información topográfica ni excluye el uso de las técnicas topográficas tradicionales, si no que se apoya en ellas para compensar sus propias deficiencias.

## Referencias

- Chen, L. (29 de Agosto de 2017). *Pix4d*. Obtenido de <https://pix4d.com/rtk-ppk-drones-gcp-comparison/>
- Colomina, P. M. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79-97.
- Haala, M. C. (2013). QUALITY OF 3D POINT CLOUDS FROM HIGHLY OVERLAPPING UAV IMAGERY. *international archives of the photogrammetry*, 183-188.
- Grussenmeyer, O. A. (2002). Solutions for exterior orientation in photogrammetry, a review. *ENSAIS*, 1-15.
- Chai, R. D. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error- arguments against avoiding RMSE in literature. *Manuscript prepared for Geosci. Model Dev. Discuss. with version 4.1 of the LATEX class copernicus discussions.cls.*, 1-11.
- Trimble. (2003). Real-Time Kinematic Surveying, Trainig guide. *Part Number 33142-40*, 33-56.