

Mapeo y estimación de parámetros estructurales de bosques utilizando fotogrametría aérea

Facundo Pessacg^{*†}, Francisco Gómez-Fernández^{*†}, Matías Nitsche^{*} y Pablo De Cristóforis^{*†}

^{*}CONICET-Universidad de Buenos Aires, Instituto de Investigación en Ciencias de la Computación (ICC)

[†]Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Computación

Resumen—En este artículo presentamos una metodología de trabajo para realizar el mapeo y la estimación de parámetros estructurales de bosques utilizando técnicas de fotogrametría aérea. Para ello se emplea un vehículo aéreo no tripulado (VANT) de ala fija capaz de sobrevolar de forma autónoma la zona de interés a partir de un plan de vuelo definido según las características del terreno y las condiciones meteorológicas. Se detallan los componentes de hardware del VANT, las herramientas de software empleadas para programar la misión y para procesar las imágenes capturadas, así como también las tareas de campo requeridas. Como casos de estudio, se presentan resultados obtenidos en zonas boscosas del Parque Nacional Nahuel Huapi y del Parque Nacional Ciervo de los Pantanos.

Keywords—fotogrametría aérea, mapeo de bosques, VANT.

I. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

La drástica reducción de los bosques nativos en la Argentina en las últimas décadas refleja la necesidad de establecer mecanismos de equilibrio ecosistémico, encaminados a proteger el medio ambiente de una deforestación desmedida, que indudablemente afectan los ecosistemas de nuestro país y los ciclos bio-atmosféricos del planeta. Por tanto, la caracterización, relevamiento y monitoreo de las zonas forestales es clave desde el punto de vista ambiental, económico y social y permite una gestión adecuada de su manejo, protección y aprovechamiento sustentable para la transformación de bienes y servicios provenientes de los mismos.

Las imágenes satelitales y los índices derivados de ellas son útiles para el monitoreo del cambio de uso de suelo (CUS) y de la funcionalidad de los bosques a escala regional, pero no para caracterización ni para el monitoreo del bosque a escala predial. Por otro lado, el trabajo de campo brinda información de alto detalle, pero resulta poco eficiente en términos de la relación costo económico-superficie analizada y conlleva un riesgo potencial para el personal involucrado.

En el último tiempo, se han realizado trabajos que utilizan vehículos aéreos no tripulados (VANT) como sensores remotos para el monitoreo ambiental. Los VANTs presentan varias ventajas frente al trabajo de campo y a las imágenes satelitales: tiempo arbitrario de revisita, alta resolución espacial, independencia de la nubosidad, bajo costo y riesgo de operación. Existe un interés creciente en el uso de esta tecnología en el análisis de patrones espaciales en el campo de la ecología en



Figura 1: Lanzamiento del VANT basado en el fuselaje Skywalker 1900.

general [1], y en el monitoreo de bosques en particular [2]. Dicho interés se ve reflejado en la aparición de comunidades de profesionales e investigadores que utilizan VANTs para el monitoreo de zonas naturales o en situaciones de catástrofes, tales como ConservationDrones [3] o DroneAdventures [4].

Algunos ejemplos de aplicación de esta tecnología incluyen el monitoreo de la erosión del suelo [5], [6], vida salvaje [7]–[9], sitios de excavaciones [10] e incluso la prevención de caza furtiva [11]. El objetivo de nuestro trabajo es alcanzar una metodología para la caracterización y monitoreo de zonas forestales basado en el uso de VANTs y técnicas de fotogrametría aérea, que sea una herramienta para las instituciones relacionadas al manejo y la gestión de bosques.

II. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL VANT

Para la construcción del VANT se optó por fuselajes livianos de tipo ala fija construidos en material EPO y fibra de carbono. A diferencia de los VANT de tipo multicoptero, los de ala fija presentan mayor autonomía de vuelo y capacidad de carga, características fundamentales para la aplicación en cuestión.

Se probaron dos modelos de fuselaje: el Skywalker X5 que es de tipo ala volante sin cola, de 1180mm de envergadura y 1020mm de longitud y el Skywalker 1900 que es un fuselaje de ala fija con cola, de 1900mm de envergadura y 1180mm de longitud. Ambos fuselajes poseen una cabina que actualmente admite una carga útil de entre 500g y 600g aproximadamente, pero esto depende de la configuración de motor y hélice que se utilice. El avión incluye además el autopiloto, las baterías, la cámara digital, los componentes de comunicación y actuadores.

Para ambos fuselajes se utilizaron servomotores Emax ES08MD (uno por superficie de control). En ambos fuselajes, se utilizó como motor de propulsión un Emax GT2812/05, con un controlador Turnigy Plush 40A. En el caso del Skywalker 1900 se utiliza una hélice $9 \times 3,6$ mientras que para el Skywalker X5 $9 \times 3,8$. En ambos casos el autopiloto es un Pixhawk v1 que corre el software de navegación de código abierto ArduPilot¹ (en su versión APM:Plane). Como enlace de radiocontrol se empleó el sistema Dragon Link (potencia de transmisión de 1W) que opera en la frecuencia de 433 MHz y para la telemetría, un modem RFD900 (frecuencia de 900 MHz). Respecto de los sensores, el autopiloto Pixhawk posee una unidad inercial y barómetro internos. Además se utilizó un módulo GPS U-Blox Neo 8M, que incluye un magnetómetro y un sensor de velocidad de viento (tubo Pitot). Para la adquisición de imágenes se empleó una cámara Canon PowerShot SX260 HS de 12MP. En ambas cámaras se instaló el firmware del proyecto Canon Hack Development Kit (CHDK²), el cual permite controlar el disparo desde el autopiloto. Por último, respecto de las baterías se emplearon dos packs (2P) de polímero de litio (LiPo), cada uno de tres celdas (3S) y con una capacidad de 5,000 mA.

Luego de realizarse pruebas de vuelo con ambos fuselajes se encontraron ventajas comparativas del Skywalker 1900 por sobre el X5 para la aplicación en cuestión. En primer lugar, el Skywalker 1900 presenta un vuelo más lento y estable debido a su mayor envergadura. Esto facilita considerablemente alcanzar el vuelo autónomo y también minimiza los movimientos en vuelo que puedan generar un desenfoque (*motion blur*) de las imágenes adquiridas. En segundo lugar, con el fuselaje Skywalker X5, se requiere de una catapulta o un elástico que permita proporcionarle la velocidad mínima de vuelo en un tiempo suficiente corto para lograr el despegue, mientras que con el Skywalker 1900 se puede hacer un lanzamiento directamente con la mano, ya que su velocidad mínima de sustentación es mucho menor. En tercer lugar, la capacidad de carga y la autonomía de vuelo es superior en el caso del Skywalker 1900. Por estas razones se continuó trabajando con este fuselaje.

III. MISIÓN DE VUELO Y TRABAJO DE CAMPO

Para elaborar la misión de vuelo y monitorear la ejecución de la misma se utiliza lo que se denomina una Estación Terrena de Control o *Ground Control Station* (GCS). La misma consiste en un sistema de software que se ejecuta en una computadora portátil que se lleva al terreno a relevar y que permite planificar y transmitir al VANT la misión de vuelo, mostrar el progreso de la misma y monitorear datos de los sensores de abordo. Si bien existen diversos sistemas de software para implementar un GCS, tanto libres como comerciales, el más utilizado junto al sistema ArduPilot es el Mission Planner. Esta herramienta posee limitaciones desde el punto de vista de código abierto (sólo está disponible para

el sistema operativo Microsoft Windows), pero tiene un alto grado de integración con el proyecto ArduPilot.

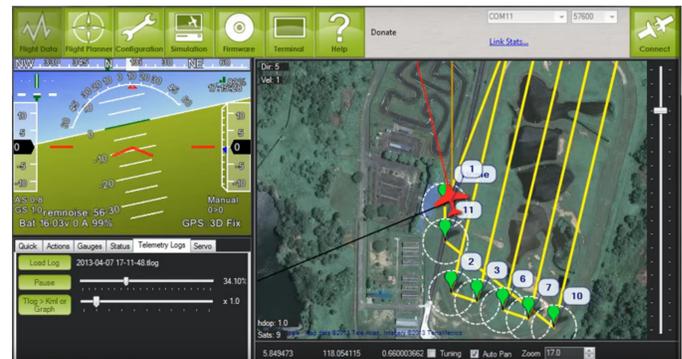


Figura 2: Captura del software Mission Planner durante la ejecución de un plan de vuelo. En la pantalla de la derecha se puede observar parte de la grilla que representa la trayectoria de vuelo con los waypoints correspondientes.

La misión de vuelo es típicamente elaborada con antelación al momento del relevamiento. Se requiere definir el área de interés mediante un polígono sobre la vista de mapa satelital del Mission Planner. Luego, Mission Planner genera automáticamente una misión de vuelo que consiste en una trayectoria en forma de grilla que abarca el área de interés haciendo repetidas pasadas lineales sobre la misma.

La misión se ajusta con parámetros tales como: la altura y velocidad de vuelo, los parámetros de la cámara (longitud focal y resolución), solape horizontal y vertical entre fotografías a adquirir, entre otros. Además de la trayectoria, la misión autogenerada incluye puntos específicos en los cuales la cámara debe ser disparada para tomar cada fotografía. Finalmente, debe planificarse en forma manual el punto y trayectoria de aterrizaje, así como el punto de despegue y la trayectoria entre éste y el de comienzo de la grilla, siempre considerando que los gradientes de altura sean factibles de realizar por el VANT.

Si bien la grilla generada automáticamente por el Mission Planner suele ser adecuada, deben considerarse también factores climáticos (como la dirección del viento) y la topología del terreno. Es importante planificar la misión de forma tal de evitar tener un viento cruzado durante el vuelo y de contar con viento de frente para el despegue y aterrizaje. También es importante considerar las pendientes que pudiera tener el terreno, tratando siempre que el VANT vuele paralelo a las mismas para evitar cambios bruscos de altura.

Una vez definida completamente la misión, es enviada al autopiloto desde el GCS. Hecho esto, el VANT puede despegar, ejecutar la misión y aterrizar en forma autónoma con solo colocarlo en modo AUTO y lanzarlo adecuadamente.

A partir de las imágenes adquiridas durante el vuelo, es posible realizar una registración y nube de puntos 3D sin mayor información. Sin embargo, la correctitud de la misma en comparación con la superficie real relevada requiere de mayor información. Usualmente, las imágenes son asociadas con la coordenada GPS en donde fueron adquiridas, empleando el receptor que utiliza el propio VANT para guiar su vuelo. Un

¹<http://ardupilot.org/>

²<https://chdk.fandom.com/wiki/CHDK>

GPS convencional es capaz de resolver la posición 3D del vehículo con un error de varios metros de magnitud. Por ende, esta información por sí sola no resulta en una reconstrucción suficientemente precisa del ambiente.

Por este motivo, usualmente se requiere el uso de puntos de control: puntos identificables en las imágenes adquiridas por el VANT cuya posición geoespacial (latitud, longitud y altitud) es conocida con gran precisión. Usualmente se utilizan patrones impresos que puedan colocarse de manera fija en el terreno y que presenten un punto de gran contraste fácilmente identificable desde la altura de vuelo. Otra posibilidad es tomar como punto de control alguna estructura fija que se encuentre presente en el terreno y pueda identificarse visualmente. Al emplear puntos de control, no sólo se confiere una mejor georeferenciación al mapa final sino que fundamentalmente se obtiene una mayor precisión debido a las restricciones fuertes impuestas por estos puntos sobre la reconstrucción. Por último, cabe mencionar que es usual emplear un subconjunto de los puntos de control georeferenciados no para la reconstrucción en sí, sino para la evaluación cuantitativa de la misma.

Para conocer la posición de los puntos de control de manera precisa, la solución típica consiste en utilizar un GPS diferencial. Se trata de un sistema que proporciona a los receptores de GPS correcciones de los datos recibidos de los satélites. El fundamento radica en el hecho de que los errores producidos por el sistema GPS afectan de forma muy similar a los receptores situados próximos entre sí. Para el uso de un GPS diferencial se cuenta con dos receptores. Uno de ellos se considera la *base* y se ubica en forma fija durante todo el proceso. El otro, se denomina *rover* y es el que se va ubicando en los distintos puntos a medir. A partir de una comunicación en tiempo real entre ambas unidades (típicamente mediante un enlace de radio) y un sistema de procesamiento de los datos adquiridos por ambos, es posible lograr una corrección de la posición del *rover* respecto de la base con muy buena precisión. Esta forma de funcionamiento de un sistema de GPS diferencial se conoce como RTK (*Real Time Kinematics*) y permite obtener un resultado en tiempo real a partir de las observaciones mutuas de ambos receptores. La solución de la posición del *rover* puede tener una precisión en el orden de pocos metros (solución *float*) o en el orden de pocos centímetros (solución *fix*), dependiendo de la calidad de la señal y la visibilidad de satélites cuando se realiza el trabajo.

Debido a que no siempre es factible obtener una solución *fix* y que se requiere un enlace permanente entre ambas unidades, una segunda opción más práctica es conocida como PPK (*Post-Processing Kinematics*). En este caso, ambas unidades simplemente almacenan las observaciones crudas durante todo el relevamiento y luego se realiza la corrección empleando un algoritmo de post-procesamiento de los datos (en nuestro caso utilizamos la biblioteca RTK-Lib³). De esta forma, se logra una solución *a posteriori* similar a la que se hubiera obtenido si se tuviera un enlace de comunicación entre los receptores GPS en el terreno.

³<http://www.rtklib.com>

La dificultad que trae aparejado el uso de puntos de control es el trabajo tedioso que esto implica: deben fijarse los patrones de forma manual en cada ubicación elegida en el entorno y tomar su posición durante un cierto tiempo. Siendo que usualmente se requiere una gran cantidad de puntos de control y una distribución mayormente homogénea sobre el terreno, esto puede conllevar varias horas o incluso días de trabajo, durante los cuales los patrones deben permanecer fijos sin ningún tipo de alteración. En el caso particular del relevamiento de bosques, esta tarea se torna más difícil e incluso puede no ser posible: si se trata de un bosque cerrado, es muy probable que no haya zonas donde puedan colocarse los patrones y que sean observables desde el aire. Por esta razón, una alternativa que se ha comenzado a explorar en los últimos años, consiste en colocar un sistema PPK en el VANT. Esto implica agregar un segundo receptor GPS y antena al avión, pero se evita un gran número de puntos de control en el terreno, manteniendo sólo conjunto pequeño de los mismos que se utiliza luego para la evaluación de la reconstrucción.

IV. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Una vez que se cuenta con las imágenes georeferenciadas se puede proceder a la construcción de un ortomosaico y de una nube de puntos 3D del terreno. Para esto se utiliza una técnica de Visión por Computadora denominada *Structure From Motion* (SFM) [12]. A partir de múltiples imágenes solapadas de la misma escena tomadas desde distintas posiciones se establecen correspondencias entre puntos salientes en las imágenes y se los triangula para estimar su ubicación en el espacio tridimensional. Luego se refina simultáneamente las coordenadas 3D de esos puntos salientes y los parámetros del movimiento relativo de la cámara (problema que se conoce como *Bundle Adjustment* y que se resuelve mediante métodos de optimización no lineal). La información tridimensional así obtenida define un muestreo sobre la superficie observada, representada como una nube de puntos o mapa 3D, que describen la geometría de la escena. A partir de la nube de puntos 3D se puede generar una representación volumétrica del entorno y un modelo digital de superficie (*Digital Surface Model* o DSM).

Para realizar el procesamiento de las imágenes descripto se evaluaron dos herramientas: el sistema de código abierto OpenDroneMap⁴ (al cual se le realizaron varias mejoras) y el software comercial Agisoft Metashape⁵:

IV-A. OpenDroneMap

OpenDroneMap es un kit de herramientas de línea de comandos de código abierto que resuelve todo el procesamiento necesario para obtener ortomosaicos y reconstrucciones tridimensionales a partir de un conjunto de imágenes. Por otro lado, existe un proyecto denominado WebODM (también de código abierto) que consiste en una interfaz web que permite cargar fácilmente imágenes y que las reconstrucciones se hagan en forma automática en el servidor donde está alojado

⁴<https://www.opendronemap.org>

⁵<https://www.agisoft.com>

este sistema. Esta interfaz resulta en una solución que puede ser utilizada por un usuario no experto, además de que elimina la necesidad de contar con una computadora propia con suficiente poder de cómputo para correr el sistema. Este último punto presenta una enorme ventaja por sobre otros sistemas existentes ya que permite obtener una reconstrucción en forma remota y verificar resultados parciales antes de completar una misión de relevamiento, y así corregir cualquier error y repetir la misión si fuera necesario. Por último, es posible extender este sistema agregando nuevas funcionalidades, que a su vez quedan directamente a disposición del usuario. En la Sección V mostramos ejemplos las nuevas características desarrolladas.

IV-B. Agisoft Metashape

Agisoft Metashape es un software comercial que actúa de manera semi-automatizada, no necesita de otras aplicaciones adicionales, ni tampoco requiere conexión a internet. Presenta una forma de trabajo secuencial, donde el usuario tiene que ir realizando cada uno de los pasos, desde la carga de las imágenes hasta el postprocesamiento de los puntos 3D. Este esquema tiene la ventaja de que resulta sencillo detectar errores y volver atrás, o cambiar alguna configuración para obtener los resultados esperados. Sin embargo, requiere de más tiempo y conocimiento técnico para ser aprovechado. Por otro lado, posee herramientas intuitivas para cargar puntos de control en las reconstrucciones y optimizar o evaluar la precisión de la reconstrucción. En las versiones más nuevas del software, se incorporaron herramientas que permiten trabajar sobre la nube de puntos y clasificar diferentes objetos como árboles, suelo, calles u otros objetos. Sin embargo, aún no funcionan correctamente para muchas de las reconstrucciones más comunes y especialmente para bosques.

V. RESULTADOS

En esta sección presentamos los resultados en función de la metodología de trabajo descrita anteriormente. En primer lugar evaluamos el sistema GPS diferencial utilizando durante este trabajo para poder caracterizarlo. En segundo lugar, presentamos los resultados de un relevamiento realizado en un área boscosa del Parque Nacional Ciervo de Los Pantanos. En este caso se realizó la segmentación por alturas del DSM para identificar distintos estratos arbóreos. En tercer lugar, se muestran los resultados de la detección de cambios en una zona del Parque Nacional Nahuel Huapi donde se estaba llevando a cabo una desforestación autorizada.

V-A. Evaluación del GPS diferencial

En este trabajo se utilizó el kit Emlid Reach como GPS diferencial (GPS-DIF), el cual es un sistema RTK/PPK de bajo costo. Debido a que no es un sistema que garantiza una determinada precisión, resulta relevante conocer su desempeño en la práctica y, en particular, en el contexto de una zona boscosa, donde el cielo se encuentra parcialmente cubierto. Para analizar la precisión del mismo, se empleó una Estación Total Pentax R1505N, que permite realizar mediciones de muy alta precisión (menor a $5cm$) en forma relativa. De

esta manera, se colocaron estacas de medición cada $20m$ aproximadamente, desde una distancia mínima de $20m$ de la base, hasta una distancia máxima de $120m$. En cada caso, se midió la posición exacta de cada estaca con la estación Total y con el GPS diferencial, para luego comparar los resultados mediante el error absoluto de cada pose. Como resultado sobre todas las mediciones, se obtuvo un error absoluto medio por eje de $\bar{e}_X = 0,297m$, $\bar{e}_Y = 0,021m$ y $\bar{e}_Z = 0,176m$. La diferencia de error absoluto medio en X e Y se puede atribuir a la distribución del bosque en el lugar de medición, en el cual se produjo una forma de corredor con árboles en los laterales, disminuyendo mayormente la señal en la dirección del eje X . Esto prueba las perturbaciones que provocan los bosques en las mediciones de GPS. Si bien usualmente se reporta una precisión centimétrica en sistemas GPS diferencial, con el modelo empleado y en un entorno boscoso, se alcanza una precisión ligeramente menor.

V-B. Evaluación de la reconstrucción

La precisión en la localización de las fotografías adquiridas impacta directamente en la precisión de la reconstrucción obtenida. En este sentido, se compararon cuatro métodos de localización de las imágenes en diferentes configuraciones a detallar a continuación.

El método 1 consiste en utilizar directamente la posición provista por el GPS del VANT. De esta forma, el error de precisión en la posición de cada imagen puede ascender hasta $10m$. El método 2 consiste en utilizar, además de la posición del GPS del VANT, puntos de control (GCP) distribuidos en la zona de relevamiento, los cuales actúan como anclas en el procesamiento de la reconstrucción. La posición de cada uno de los GCP fue adquirida utilizando un GPS diferencial (GPS-DIF) modelo Emlid Reach. Este método es el utilizado cuando se realizan relevamientos con VANT comerciales, los cuales cuentan con un GPS estándar a bordo. El método 3, consistió en montar en el VANT uno de los receptores Emlid Reach como unidad *rover*, dejando la otra unidad fija en tierra como base. Para obtener la mayor precisión posible se optó en este caso emplear el método de PPK para obtener una localización precisa *a posteriori*, además de evaluar la factibilidad de este enfoque en contrapartida con una basada exclusivamente en puntos de control y GPS estándar.

Para este método es importante conocer la ubicación geoespacial del sistema GPS-DIF en el momento justo en el que se adquiere la imagen. Si bien se cuenta con el pulso que envía el autopiloto a la cámara para ordenar la captura de cada fotografía, existe un tiempo de latencia entre el pulso y la adquisición propiamente dicha. Asimismo, este retardo no es fijo ya que depende de los procesamientos internos de la cámara en distintas situaciones (por ejemplo si se encuentra ocupada en proceso de escritura sobre la tarjeta de memoria). Para conocer el instante preciso en el que la foto fue adquirida, se aprovechó la capacidad que ofrece el firmware CHDK para pulsar uno de los LEDs indicadores de la cámara justo antes de la captura. Para emitir una señal al GPS-DIF en ese mismo

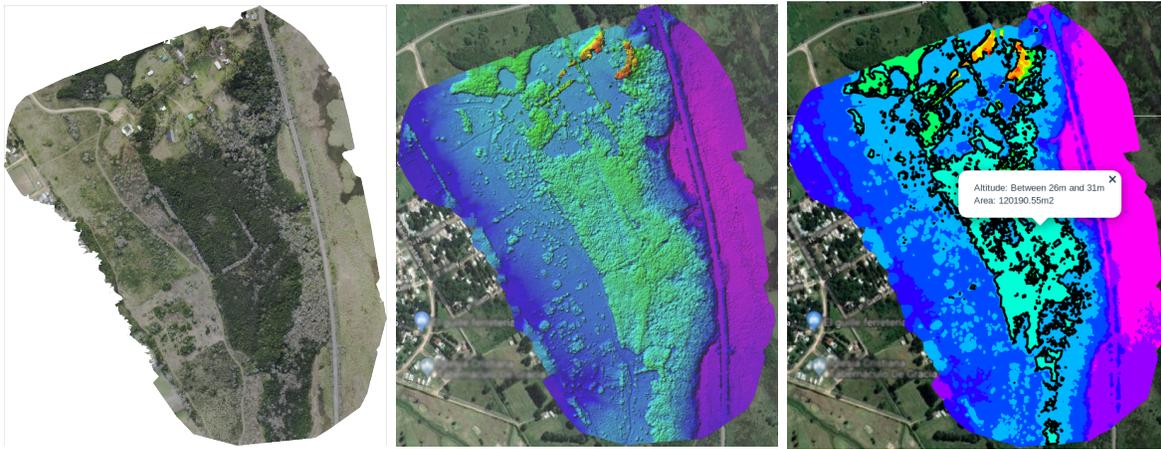


Figura 3: Reserva Natural Ciervo de Los Pantanos. Izquierda: Ortomosaico generado. Medio: mapa de alturas correspondiente. Derecha: segmentación estratificada por alturas.

instante, se colocó un fotodiodo sobre el LED exterior de la cámara que genera un pulso cuando el LED se enciende.

Por último, el método 4 consiste en combinar los métodos 2 y 3, es decir, se utilizaron las fotografías con posiciones precisas dadas por el GPS-DIF y, además, se optimizó la reconstrucción utilizando los puntos de control. Esta alternativa tiene como objetivo obtener un límite práctico de la mejor precisión que podría lograrse y que sirva como referencia al resto de las configuraciones posibles.

Para la comparación entre los métodos, se colocaron 11 puntos de control en un área de 80 hectáreas. Se utilizaron 6 puntos de control para la reconstrucción y los 5 restantes para evaluar la precisión para todos los métodos. El error medio es el estimado por el software comercial Agisoft Metashape (Sección IV) luego de fijar la configuración para cada uno de los métodos.

Método	Técnica	Error Medio (m)
1	GPS	6.47
2	GPS + GCP	3.49
3	GPS-DIF	3.37
4	GPS-DIF + GCP	1.93

Cuadro I: Comparación del error medio en las reconstrucciones para los diferentes métodos utilizados.

Como se puede observar en el Cuadro I, con el método 1 que utiliza únicamente la posición de las fotografías provista por el GPS estándar del VANT se obtiene una precisión en el orden del error esperado para un GPS estándar. En el caso del método 2, si bien se observa una mejora con respecto al método 1, todavía se tiene un error considerable. En este caso, podemos atribuir este resultado a que la cantidad de puntos de control utilizados en relación con el área relevada es muy baja y debería aumentarse. El método 3 se obtuvo una precisión similar al 2. Esto lo podemos atribuir a las limitaciones del GPS-DIF Emlid Reach utilizado, que solo es capaz de recibir la banda L1 de los sistemas GPS. Esto se confirma con el resultado del método 4, que al emplear también puntos de control mejora la precisión del método 3.

V-C. Segmentación por alturas

Utilizando el software OpenDroneMap (ver sección IV) antes mencionado se procesaron imágenes capturadas de una zona boscosa del Parque Nacional Ciervo de los Pantanos. En la Figura 3 se pueden observar el ortomosaico y el DSM obtenidos, junto con la segmentación estratificada por alturas desarrollada en este trabajo. Esta segmentación nos provee de parámetros estructurales que permiten realizar diferentes clasificaciones del tipo de bosque: en base a la altura de los individuos, el nivel medio de los árboles, diferenciar zonas de bosques de zonas de arbustos o pastizales, entre otros.

Esta nueva herramienta permite segmentar el ortomosaico según los rangos de alturas especificados por el usuario, mostrados en diferentes colores (ver la imagen de la derecha en la Figura 3), con respecto al modelo del terreno (*Digital Terrain Model*), o con respecto al nivel del mar. Además, se agregó la posibilidad de etiquetar estas áreas segmentadas para incluir información subministrada por el usuario. Estas dos herramientas fueron incorporadas al sistema de código abierto OpenDroneMap, extendiendo y ampliando de manera cualitativa las capacidades de este software.

V-D. Detección de Deforestación

Para la detección de deforestación, se realizaron vuelos autónomos con un VANT comercial modelo Mavic 2 Pro sobre una zona de 150x200 metros aproximadamente, dentro del Parque Nacional Nahuel Huapi. En la misma, se estaba produciendo una deforestación autorizada para la construcción de una ruta, lo cual representó una oportunidad única para estudiar cómo se puede detectar el desmonte a partir del procesamiento digital de imágenes capturadas por VANTS.

Para los experimentos, se realizaron vuelos antes y después de la deforestación y se compararon las nubes de puntos 3D obtenidas para cada vuelo mediante el software de código abierto CloudCompare⁶. Esta comparación consiste en un alineamiento relativo entre las dos nubes de puntos y una

⁶<http://www.cloudcompare.org/>

posterior estimación de las distancias entre las coordenadas 3D de ambas nubes. Debido a que las nubes son los suficientemente densas, estas distancias representan la diferencias en altura para cada punto de la nube con respecto a la otra. En la Figura 4 se presenta un ejemplo de estos experimentos, en donde se talaron tres árboles de aproximadamente 40m de altura. Como resultado del análisis puede verse la diferencia detectada producto de la tala, así como el valor de altura diferencial representado mediante una escala de colores.

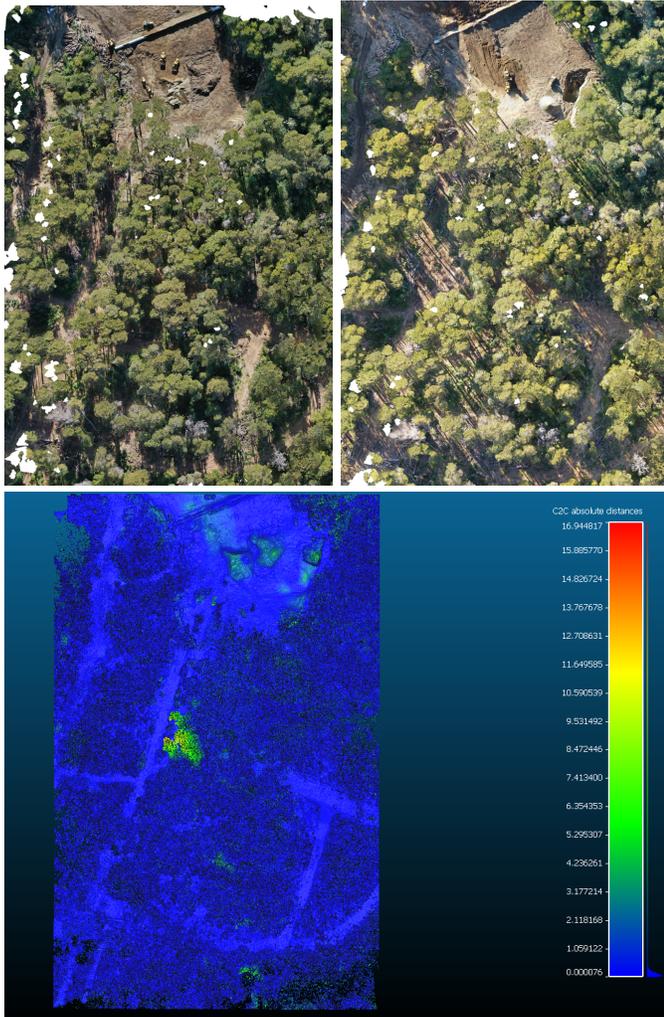


Figura 4: Se muestran dos ortomosaicos de la misma área relevada utilizando un VANT Mavic 2 Pro. A la izquierda el ortomosaico inicial, y a la derecha el ortomosaico obtenido luego de realizar la tala de 3 árboles. Abajo se observa la comparación de las dos nubes de puntos. Cada color indica la diferencia en metros entre las nubes.

VI. CONCLUSIONES

La metodología de trabajo aquí introducida muestra los alcances, posibilidades y limitaciones para el empleo de VANTs en el mapeo y estimación de parámetros estructurales de bosques. Esta metodología incluye la planificación de una misión de vuelo para el área a relevar, el trabajo de campo requerido, la captura automática de fotografías aéreas

durante el vuelo y el posterior procesamiento de las mismas mediante técnicas de procesamiento de imágenes y visión por computadora.

Se presenta el desarrollo de herramientas para la segmentación de alturas en las zonas relevadas y la posibilidad de anotación o etiquetado de las mismas. También la posibilidad de detectar cambios debido a la tala de árboles. Estas herramientas fueron incorporadas al sistema open-source OpenDroneMap, generando gran interés en la comunidad. Se muestran los resultados obtenidos en zonas boscosas del Parque Nacional Nahuel Huapi y del Parque Nacional Cervo de los Pantanos.

Respecto de los métodos o configuraciones evaluadas para llevar a cabo el relevamiento podemos concluir que dado que en zonas boscosas la colocación de puntos de control resulta difícil o incluso imposible en algunos casos, utilizar un GPS-DIF en el VANT otorga una precisión similar que colocar una cantidad baja de puntos de control en el terreno. Sin embargo, el sistema con GPS-DIF resulta más práctico y requiere menor tiempo en el trabajo de campo.

Con próximos pasos se desarrollarán métodos para extraer información acerca de otros parámetros estructurales de los bosques, tales como densidad de individuos, porcentaje de cobertura, entre otros. También se espera poder adquirir un nuevo modelo de GPS-DIF con mayor precisión para comparar resultados.

REFERENCIAS

- [1] K. Anderson and K. J. Gaston, "Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology," *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 11, no. 3, pp. 138–146, 2013.
- [2] J. Paneque-Gálvez, M. McCall, B. Napoletano, S. Wich, and L. Koh, "Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas," *Forests*, vol. 5, no. 6, pp. 1481–1507, 2014.
- [3] L. Koh, "Conservation drones," Available at: <http://conservationdrones.org/>, 2015.
- [4] E. Lubrano, "Drone adventures," Available at: <http://droneadventures.org/>, 2015.
- [5] F. Mancini, M. Dubbini, M. Gattelli, F. Stecchi, S. Fabbri, and G. Gabbianelli, "Using unmanned aerial vehicles (uav) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments," *Remote Sensing*, vol. 5, no. 12, pp. 6880–6898, 2013.
- [6] S. d'Oleire Oltmanns, I. Marzloff, K. Peter, and J. Ries, "Unmanned aerial vehicle (uav) for monitoring soil erosion in morocco," *Remote Sensing*, vol. 4, no. 11, pp. 3390–3416, 2012.
- [7] C. Vermeulen, P. Lejeune, J. Lisein, P. Sawadogo, and P. Bouché, "Unmanned aerial survey of elephants," *PloS one*, vol. 8, no. 2, p. e54700, 2013.
- [8] A. Hodgson, N. Kelly, and D. Peel, "Unmanned aerial vehicles (uavs) for surveying marine fauna: a dugong case study," *PloS one*, vol. 8, no. 11, p. e79556, 2013.
- [9] G. IV, L. G. Pearlstine, and H. F. Percival, "An assessment of small unmanned aerial vehicles for wildlife research," *Wildlife Society Bulletin*, vol. 34, no. 3, pp. 750–758, 2006.
- [10] S. Siebert and J. Teizer, "Mobile 3d mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (uav) system," *Automation in construction*, vol. 41, pp. 1–14, 2014.
- [11] L. P. Koh and S. A. Wich, "Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation," *Tropical Conservation Science*, vol. 5, no. 2, pp. 121–132, 2012.
- [12] S. Ullman, "The interpretation of structure from motion," *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, vol. 203, no. 1153, pp. 405–426, 1979.