

RECONSTRUCCIONES TRIDIMENSIONALES GENERADAS A PARTIR DE VÍDEOS E IMÁGENES PARA APLICACIONES MORFOMÉTRICAS

José Cappelletto^{1*}, Esteban Agudo-Adriani² y
Rubén Ramírez-Ramírez²

1. Grupo de Investigación y Desarrollo en Mecatrónica, Universidad Simón Bolívar. AP 1080-A. 2. Laboratorio de Ecología Experimental, Universidad Simón Bolívar. AP 1080-A. *cappelletto@usb.ve.

RESUMEN

El estudio de la morfología de los organismos ha sido básico para resolver problemas relacionados con la identificación a nivel de especie, la existencia de dimorfismo sexual, o el papel de algunos organismos que funcionan como parte del hábitat. Tradicionalmente, estos estudios han sido aproximaciones que involucran la medición directa sobre el organismo y presentan ciertas limitaciones. Recientemente, avances tecnológicos han permitido el desarrollo de técnicas como *Structure from Motion* (SfM), la cual permite obtener modelos 3D de objetos a partir de fotografías y videos. A su vez, permite tomar medidas de estructuras de los organismos de interés, que al igual que para otras mediciones, son de difícil estimación, tales como la superficie total o el volumen. SfM exhibe ventajas en términos de medición no invasiva de los objetos, y requiere de un tiempo muy corto para la captura total del video o imágenes utilizadas para el modelo, en comparación al tiempo requerido normalmente cuando se toman medidas directamente sobre el ejemplar. En el presente estudio se describe el método utilizado para realizar reconstrucciones tridimensionales de algunos ejemplares (colonias de coral) y de algunas estructuras (cráneos de mamíferos y conchas de tortugas). Adicionalmente se plantean algunas ventajas y desventajas de utilizar diferentes aproximaciones para construir dichos modelos, se mencionan algunas posibles aplicaciones para esta técnica y como podría ser una alternativa a las aproximaciones tradicionales seguidas en el estudio de la morfología en biología.

Palabras clave: Modelado, cráneos, colonias de coral, *Structure from Motion*.

Three-dimensional reconstructions generated from videos and images for morphometric applications

Abstract

The study of the morphology of organisms has been fundamental for solving problems related to identification at species level, the existence of sexual dimorphism, or the role of some organisms that functions as part of the habitat. Traditionally, these studies have been approximations that involve direct measurement over the organism and present certain limitations. Recently, technological advances have allowed the development of

techniques such as Structure from Motion (SfM), which allows to obtain 3D models of objects from photographs and videos. In turn, this allows to take measurements of structures of the organisms of interest, which like other measurements, are difficult to estimate such as the total surface or volume. SfM exhibits advantages such as the possibility of taking measurements of the objects in a non-invasive way, as it requires a very short time for the total capture of the video or images used by the model, compared to the time normally required when taking measurements directly on the specimen. The present study describes the method used to perform three-dimensional reconstructions of some specimens (coral colonies) and some structures (mammalian skulls and turtle shells). In addition, there are described some of the advantages and disadvantages of using different approaches to construct these models, as well as some possible applications for this technique, and how it could become an alternative to the traditional approaches followed in the study of morphology in biology.

Keywords: Modelling, skulls, coral colonies, Structure from Motion.

INTRODUCCIÓN

El estudio de características morfológicas de los organismos ha sido parte central de la ciencia de la biología. A partir de su estudio, ha sido posible la comparación de los organismos, lo cual ha llevado a su identificación y clasificación (Adams *y col.*, 2004; Adams *y col.*, 2013). Pese a su extenso uso, la aproximación seguida en los estudios morfológicos no ha sido estática a través del tiempo. Al igual que muchas ramas de la biología, el estudio de la morfología de los organismos experimentó un cambio notable con el paso de la biología de ser una ciencia cualitativa a una ciencia cuantitativa, originando una aproximación más metódica enfocada en las relaciones numéricas y las dimensiones de los organismos y sus partes, y no sólo en la forma (Bookstein, 1998; Adams *y col.*, 2004).

En morfología, se ha hecho un importante énfasis en el análisis de la forma, siendo esto posible gracias a la combinación de métodos estadísticos multivariados y nuevas formas de visualización de las estructuras (Adams y Funk, 1997). Ello permite el estudio de la forma integrando el tamaño de los organismos y proporcionando análisis robustos y herramientas gráficas para la cuantificación y visualización de la variación morfológica intra e interespecífica (Adams *y col.*, 2013). Igualmente, a partir de las nuevas aproximaciones a los análisis morfométricos, la forma del objeto en estudio no se describe solamente en términos de sus dimensiones, sino también de la relación espacial entre sus partes (Adams y Funk, 1997).

La morfometría geométrica permite la comparación de formas descritas a través de un conjunto de hitos morfológicos que identifican estructuras homólogas o hipotéticamente comparables (Rohlf y Marcus, 1993). Las técnicas comúnmente utilizadas proveen de una descripción precisa y certera de las formas biológicas, además de permitir una adecuada visualización, interpretación y comunicación de los resultados. La

morfometría geométrica permite visualizar diferencias complejas entre distintas formas biológicas, así como también con la puesta a prueba de distintas hipótesis estadísticas firmemente sustentadas en una base matemática (Zelditch y col., 2004).

Los análisis morfométricos permiten identificar y cuantificar diferencias asociadas a condiciones ambientales particulares, patrones geográficos (Lens y col., 2000; Kark, 2001), o a dimorfismo sexual (Fairbairn y Preziosi, 1996; Galdames y Zavando, 2012), entre otros. De igual manera, también permiten identificar cambios ontogénicos (Giannini y col., 2010; Segura y Prevosti, 2012) o características que pueden describir patrones de distribución de organismos asociados, por mencionar solo algunos ejemplos (Lavy y Cadrin, 2000; Monteiro-Filho y col., 2002).

Sin embargo, en ocasiones puede ser inviable o costoso realizar mediciones directas de las formas biológicas con el objetivo de hacer análisis morfométricos. Existen casos en los cuales es necesario realizar mediciones de forma no invasiva, rápida o con una manipulación mínima de los objetos de estudio. Ejemplo de esto es trabajar con organismos marinos, en zonas remotas o con colecciones de museo, a las cuales se puede tener acceso por un periodo limitado. Para estos casos, se requiere modificar los métodos convencionales de adquisición de datos, teniendo presente aspectos tales como costo, tiempo, manipulación de los organismos y replicabilidad o estandarización del método. Por ello, la aproximación a los problemas morfológicos ha experimentado cambios radicales y, a su vez, los métodos utilizados para realizar dichas mediciones (Adams y col., 2013).

El uso de reconstrucciones tridimensionales a partir de fotos y videos representa una solución a varios de estos problemas, siendo una alternativa a los métodos tradicionales utilizados para realizar mediciones morfométricas. En las dos últimas décadas han habido importantes incrementos en la capacidad de procesamiento de los equipos de computación, nivel de resolución de los equipos de fotografía y video y, más importante aún, avances en algoritmos de procesamiento de imágenes y visión artificial (Cocito y col., 2003; Burns y col., 2015). *Structure from Motion* (SfM) es una técnica de reconstrucción y estimación de movimiento de las cámaras, que permite la generación de modelos tridimensionales de objetos rígidos (Snavely y col., 2008; Kwasnitschka y col., 2013; Burns y col., 2015). Su bajo costo en términos de equipo, robustez ante las condiciones de captura de imágenes, relativa facilidad de uso y amplia disponibilidad de implementaciones en computadora, convierten a esta técnica en una opción a varios métodos tradicionales de aproximación a problemas ecológicos y morfométricos.

El principio de funcionamiento de SfM es la estimación del movimiento de la cámara a partir de la relación de movimiento que existe entre cada una de las imágenes utilizadas como entrada. Cada imagen es analizada y se le

extraen puntos de referencia que son comparados estadísticamente entre todo el conjunto de imágenes. A partir de dichos puntos y, asumiendo que el objeto a reconstruir es rígido, se obtiene un estimado del movimiento de la cámara. Con esta información se genera, mediante triangulación, una nube de puntos tridimensional que corresponde a la forma bastante aproximada de la superficie reconstruida. Finalmente, se genera una superficie tipo malla, que preserva el detalle suficiente y la información de color correspondiente al objeto original.

Existen múltiples herramientas computacionales que permiten aplicar SfM para imágenes, pero casi todas siguen el esquema previamente descrito. En este trabajo no se hace énfasis en la configuración específica de dichas herramientas, sino en el proceso de captura de las imágenes de entrada, se ilustran algunas aplicaciones, así como los posibles análisis a los cuales pueden ser sometidos los modelos tridimensionales obtenidos.

A lo largo del presente manuscrito, se describe el uso de reconstrucciones tridimensionales como método para la cuantificación morfológica de varios tipos de organismos y estructuras. Para ello, se detalla el proceso de adquisición de imágenes a partir de fotografías y videos, y la posterior generación de reconstrucciones tridimensionales de estructuras tales como: cráneos de báquiro y delfin, caparazones de tortugas y colonias de coral. Dicho método de reconstrucción persigue preservar la suficiente generalidad como para permitir su aplicación a otras estructuras. Se mencionan las ventajas y desventajas de las distintas formas de aplicar el método en función del objeto de estudio. Vale destacar que este método permite efectuar mediciones *in situ*, con una relación costo-beneficio que la hace atractiva para un amplio rango de aplicaciones. Finalmente, se discuten algunos casos de uso de estas reconstrucciones en la resolución de problemas en ecología.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de reconstrucción de modelos tridimensionales de objetos rígidos consiste típicamente en captura, preprocesamiento y alineación de imágenes, generación de nube de puntos y generación de superficie. En la Figura 1 se ilustran los pasos del proceso antes mencionado y a continuación se describe con detalle los procedimientos empleados en cada una de las etapas del proceso de reconstrucción 3D, destacando las consideraciones más importantes que permiten adaptar al método según la aplicación deseada.

Captura de imágenes. Esta etapa consiste en el uso de un dispositivo para la adquisición de múltiples imágenes del objeto a ser reconstruido. Para ello, se pueden utilizar una amplia gama de cámaras, que en la actualidad proveen de la resolución suficiente para este tipo de aplicaciones.

Cabe mencionar que, típicamente, los métodos de reconstrucción tridimensional de objetos se basan en el uso de fotografías como imágenes de entrada. Sin embargo, algunos trabajos más recientes han hecho uso de videos como entrada al proceso. Ambas alternativas presentan distintas ventajas y desventajas que pueden ser aprovechadas en función de la aplicación. A continuación se describe el método empleado en cada caso, resumiendo luego las principales diferencias.

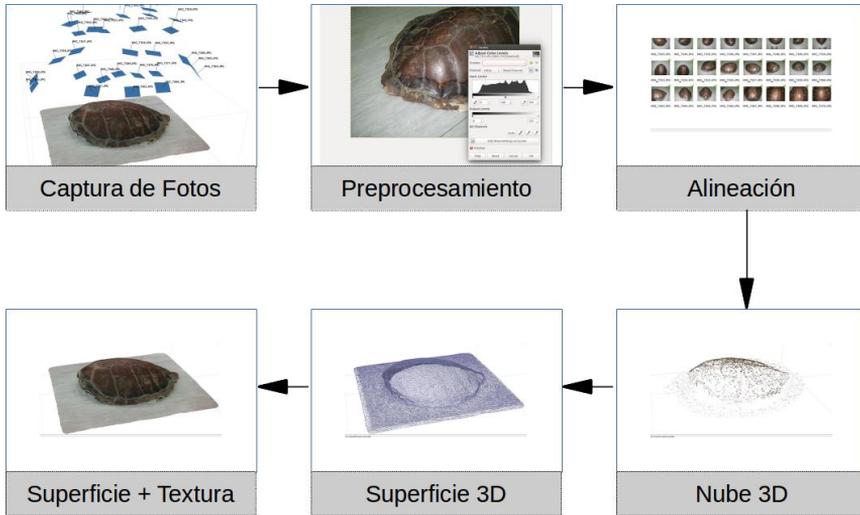


Figura 1. Diagrama del proceso de reconstrucción 3D.

Captura por fotografía. Este método es el más difundido, principalmente porque las primeras implementaciones para SfM empleaban fotografías como entrada. Adicionalmente, esta opción suele requerir un paso menos que la alternativa de captura por video. Para este caso se tienen las siguientes consideraciones:

- (1) Se coloca el objeto a reconstruir sobre un fondo uniforme que provea de suficiente contraste.
- (2) Se mantienen las condiciones de iluminación lo más constantes posible.
- (3) Se evita movimiento alguno de la escena objeto-fondo.
- (4) Se procede a adquirir las fotografías con una o múltiples cámaras simultáneamente. Se sigue un movimiento alrededor del objeto, buscando cubrir la totalidad de la superficie que se desea reconstruir. Una alternativa es mantener la(s) cámara(s) fija(s) mientras se rota el objeto a reconstruir.

Existen algunas consideraciones que deben ser tomadas en cuenta, en términos del método y del equipo empleado:

- (1) Se debe lograr un solapamiento de 40% a 80% entre cada foto. Un mayor solapamiento incrementa el número de fotos y el costo de procesamiento a posterior, sin proveer mayor ganancia en la calidad de la reconstrucción. Un menor solapamiento compromete el proceso de reconstrucción, pudiendo fallar por falta de continuidad en el modelo.
- (2) La resolución de la cámara debe de ser mayor a 5 Megapíxeles. Resoluciones superiores a 14 Megapíxeles pueden ralentizar el procesamiento de las imágenes, e incluir ruido en el modelo tridimensional reconstruido.
- (3) Se recomienda el uso de un lente de baja distorsión, en el rango de 28 a 80 mm para cámaras SLR (o su equivalente si es una cámara compacta).
- (4) Los parámetros de ISO, apertura, velocidad de obturación y balance de blancos deben ser mantenidos constantes, en la medida de lo posible. Esto reduce las diferencias entre las distintas imágenes producidas por cambios en la configuración de la cámara.

Captura por video. El proceso de captura de las imágenes por video consiste principalmente en filmar el objeto desde distintos ángulos, obteniéndose así, la mayor cantidad de imágenes de la superficie. A continuación se listan las consideraciones más importantes a tener en cuenta al momento de efectuar la captura por video:

- (1) Resolución de 640 x 480 píxeles o superior. Se recomienda trabajar en 1920 x 1080 píxeles (Full HD).
- (2) Colocar el enfoque de la cámara en modo MANUAL.
- (3) Fijar el balance de blanco en modo que mejor se adapte a las condiciones de iluminación.
- (4) Utilizar un lente de baja distorsión óptica.
- (5) Filmar con movimientos suaves y continuos, evitando desenfocar la imagen debido a movimientos abruptos.

Posterior al proceso de captura de video, es necesario extraer las imágenes que servirán de entrada al proceso de reconstrucción. Éstas hacen las veces de las fotografías obtenidas por el otro método de captura. Para la extracción de las imágenes existe una amplia gama de herramientas libres y comerciales. En el presente trabajo se utilizó *ffmpeg/avconv* disponible tanto para Windows como Linux (<https://ffmpeg.org>), como herramienta de extracción de fotogramas. Los parámetros de uso de la misma son los siguientes:

Formato de salida: JPEG
Nivel de calidad: 1.0

Resolución: Igual a la del video de entrada

Tasa de muestreo: 1 a 4 fotogramas por segundo.

Dada la existencia de dos alternativas de captura de imágenes, es necesario detallar las ventajas y desventajas de cada una de las mismas. Esta información es necesaria para elegir el método que mejor se adapte a la aplicación en cuestión. La Tabla 1 provee una vista comparativa de las características más importantes de los dos métodos de captura de imágenes previamente descritos.

Tabla 1. Comparación de métodos de captura de imágenes.

Característica	Método de captura		Observaciones
	Foto	Video	
Nivel de detalle	Alto (< 4mm/pixel)	Medio (4 a 10 mm/pixel)	Las fotografías ofrecen un mayor nivel de resolución
Tamaño de archivos	Medio (<100 MB)	Alto (> 400 MB)	Tamaño total de archivos por modelo
Tiempo de captura	10 minutos a 1 hora	30 segundos a 10 minutos	El video se captura en una sola tanda
Tolerancia al error por falta de solapamiento	Baja	Media	El video ofrece suficiente redundancia para las imágenes

Tabla 2. Especificaciones de equipos para captura de imágenes y videos.

Equipo	Canon 400D	Canon G12	Galaxy SIII - mini	GoPro Hero 3
Uso	Fotografía	Video + fotografía	Video + fotografía	Video
Lente	28 - 80 mm & 70 - 300 mm	Incorporado 6.1 - 30.5 mm f/2.8 - 4.5	Incorporado	Incorporado 5.0 mm f/2.8
Resolución (píxeles)	JPEG 3888 x 2592	JPEG 3648 x 2736 H.264 - 1280 x 720	JPEG 2560x1920 H.264 1280 x 720	H.264 1440 x 1080
Velocidad de video	N.A.	24 fps	30 fps	30 fps

En función de la información presentada en la Tabla 1 y, según el tipo de objeto a reconstruir y condición de captura, se indica para cada caso una valoración cualitativa de la relación calidad-costos esperada para cada caso. En la Tabla 2 se detallan las especificaciones técnicas correspondientes a los equipos empleados en la captura de las imágenes y videos.

En el presente trabajo se procedió a la captura de objetos de naturaleza diversa, cuya descripción y condiciones de captura se detallan en la Tabla 3. El criterio de selección se basa en la búsqueda de diversidad en las condiciones de captura, dimensiones y complejidad de los objetos a reconstruir. Esto, con el objetivo de identificar las ventajas y desventajas de la metodología empleada, y su subsiguiente generalización para otros casos de aplicaciones. Cabe destacar que en la captura de video las cámaras ajustaban automáticamente el nivel de exposición y balance de blancos, salvo en las tomas subacuáticas donde se utilizaba el modo de corrección de color rojo, para compensar las pérdidas por absorción del mismo debajo del agua.

Tabla 3. Descripción y condiciones de capturas de objetos reconstruidos.

Objeto	Longitud total (aproximada)	Captura	Condiciones
Cráneo delfín	60 cm	Foto (5.1 Mpx)	16 fotos
Cráneo báquiro	52 cm	Foto (10 Mpx)	80 fotos
Caparazón	110 cm	Foto (12 Mpx) Video (1080p)	34 fotos 30 segundos
Colonia coral	50-150 cm	Foto (10 Mpx) Video (1080p)	8-14 fotos 150 segundos

Pre-procesamiento. Consiste en preparar las imágenes extraídas en la fase de captura, para su posterior utilización en las fases de alineación y reconstrucción. Dada la naturaleza heterogénea de las imágenes de entrada, pueden ser necesarios varios pasos intermedios de preprocesamiento, pero típicamente se resumen a los siguientes:

- (1) Selección de imágenes: se eliminan las imágenes que presenten defectos como desenfoque, sobreexposición, subexposición o sean redundantes debido a un alto solapamiento entre ellas.
- (2) Ajuste de niveles: mediante el uso de herramientas libres o comerciales se procede a la corrección de los niveles de colores de las imágenes. Típicamente corresponde a corrección del balance de

blanco, y de contraste y brillo. Es importante que las modificaciones se efectúen de manera consistente en cada grupo de imágenes.

- (3) Remuestreo de imágenes (video): en el método de captura por video, la tasa de muestreo de las imágenes varía de acuerdo a la velocidad de movimiento en el mismo. Si el solapamiento de las imágenes es bajo, se debe aumentar la tasa de muestreo, y viceversa.

Alineación de imágenes. Esta fase consiste en la estimación del movimiento de la cámara para cada una de las imágenes obtenidas en el paso anterior, y la alineación inmediata de cada una de ellas. Para esto, se extraen hasta 8000 puntos de interés de cada imagen, utilizando algún algoritmo de extracción de descriptores como lo son SIFT, SURF, ORB, KAZE, etc. Cabe mencionar que este proceso está automatizado en las distintas herramientas de SfM disponibles. En el presente trabajo se utilizó la implementación de SIFT que viene incluida en VisualSfM (Wu, 2011).

Una vez extraídos los puntos de interés, son comparados con los de las demás imágenes y, de esta manera, se estima el movimiento (rotación y traslación) de la cámara entre cada imagen. Con esta información, la herramienta logra reconstruir el movimiento de la cámara para la mayoría de las imágenes. A partir de la posición de la cámara en cada imagen, es posible entonces obtener la posición en tres dimensiones (3D) de cada uno de los puntos de interés. Esto provee de una nube de puntos en 3D de baja densidad, que si bien se aproxima al objeto a reconstruir, no ofrece el nivel de detalle suficiente para efectuar análisis morfométricos sobre el mismo.

Generación de nube de puntos 3D. El siguiente paso en la reconstrucción 3D de los objetos consiste en utilizar la totalidad de las imágenes, cuyas posiciones se conocen del paso anterior, y mediante la triangulación de cada uno de los puntos en cada imagen, obtener una nube de puntos mucho más densa. Dicha nube de puntos es la aproximación final de mejor calidad al modelo tridimensional equivalente del objeto reconstruido.

Cada uno de los puntos 3D del modelo posee información de posición en el espacio y de color para dicho punto. Dependiendo del tipo de objeto a reconstruir, el tipo de estudio que se está realizando y la calidad de la nube de puntos densa tridimensional, el producto obtenido en este paso puede ser suficiente para los análisis morfométricos que se deseen hacer.

Reconstrucción de superficie. Existen aplicaciones para las cuales no es suficiente con la información de posición y color de los elementos en una nube de puntos tridimensional. Ejemplo de ello es cuando se desean hacer cálculos de área, superficie y/o volumen. Para esto, es necesario generar una superficie que se aproxime de manera óptima a la superficie original del objeto a reconstruir.

En este paso se utilizan algoritmos de aproximación de superficie que minimizan la distancia de dicha superficie a la nube de puntos. Se parte de la hipótesis que el objeto a reconstruir presenta una superficie continua, y sin variaciones abruptas ni presencia importante de oquedades. Si bien es posible generar reconstrucciones de objetos que no cumplan con estas condiciones, no existen garantías de convergencia a una superficie coherente en la totalidad de los casos.

En el presente trabajo se utilizó Meshlab como herramienta para la generación de la superficie (Cignoni *y col.*, 2008). En todos los casos se utilizó el filtro de Poisson, que genera una superficie suavizada continua a partir de cualquier nube densa de puntos 3D arbitrarios. Dependiendo del caso, puede ser necesario filtrar la nube de puntos eliminando aquellos elementos muy ruidosos o que no son congruentes con el resto de los elementos. Cabe destacar que el producto de este paso es una superficie (generalmente continua) que no posee información de color para los elementos de superficie.

Proyección de texturas sobre superficie. Este último paso consiste en proyectar cada una de las imágenes, cuyas posiciones se conocen de la fase de alineación, para que sirvan de información de textura con la cual se completa la información de color de la superficie. El valor del producto de este paso reside en la capacidad de obtener un modelo tridimensional con información de color completa, inclusive en aquellos puntos donde la fase de reconstrucción de puntos quedó incompleta. Adicionalmente, permite marcar (y posteriormente analizar) hitos morfológicos en estructuras como cráneos, caparazones, conchas, etc.

Para la comparación de los tiempos de reconstrucción (desde alineación hasta proyección de textura) se utilizó en todos los casos el mismo equipo para el procesamiento. Las especificaciones más relevantes se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del equipo de procesamiento.

Sistema operativo	Ubuntu 16.04.1 LTS 64 bits
Procesador	Intel QuadCore 2.4 GHz
Memoria RAM	4 GBytes
Disco duro	500 GBytes, 7200 RPM
Tarjeta de video	EVGA nVidia GTX 750 Ti, 784 núcleos

RESULTADOS

En la presente sección se muestran los modelos obtenidos a partir de las reconstrucciones 3D de cada uno de los objetos evaluados, según se lista en la Tabla 3. Para cada una de las reconstrucciones se detalla información del modelo obtenido, indicándose número y tipo de imágenes capturadas, número de vértices de la nube de puntos densa y número de caras de la superficie generada. Cabe destacar que dada la naturaleza heterogénea de los organismos reconstruidos, para cada uno de los modelos 3D se incluye información adicional que pueda revestir interés para posteriores análisis morfométricos.

Cráneo de delfín (*Stenella sp.*). La reconstrucción de un cráneo de delfín (*Stenella sp.*), efectuada a partir de 16 fotos de 5.1 Mpx, tardó un total de 27 minutos utilizando el equipo de procesamiento detallado en la Tabla 4. En la Figura 2 se muestran las fotografías utilizadas como imágenes de entrada para la reconstrucción del cráneo. Nótese que en las mismas el patrón de iluminación de la superficie no es exactamente homogéneo.

En la Figura 3 se pueden apreciar varias vistas del modelo como nube densa, superficie y con proyección de textura. En el mismo se puede observar que no existen inconsistencias en la iluminación de la superficie, a pesar de que el patrón de iluminación del cráneo durante la captura de las fotografías dista de ser el ideal. Para el modelo denso, el conteo total de puntos 3D obtenidos fue de 1.467.679, y el número de triángulos que forman la superficie fue de 65.000.

Si bien la resolución de las fotos empleadas no es muy alta, para los estándares de las cámaras disponibles en la actualidad el número de puntos obtenido es bastante alto. Por otra parte, a pesar de que siempre se desea el mayor nivel de detalle posible, alcanzar modelos de puntos aún más densos puede aumentar el costo computacional, sin que ello represente una mejora en la calidad de la reconstrucción. Se considera, tras una evaluación cualitativa de la superficie obtenida, que el número de puntos 3D obtenidos en este modelo es suficiente para realizar mediciones.



Figura 2. Imágenes de entrada para reconstrucción de cráneo de delfin.

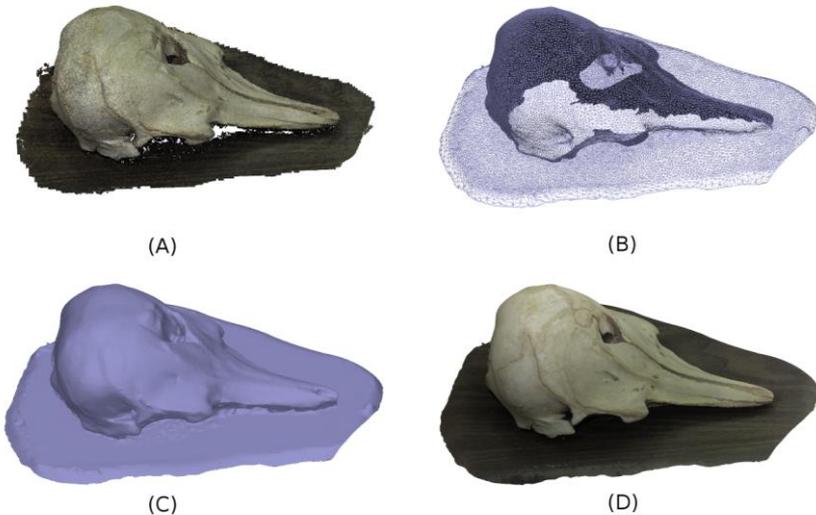


Figura 3. Modelo 3D de cráneo de delfin (A) Nube de puntos densa, (B) Malla de superficie, (C) Superficie sólida, (D) Superficie con textura.

Cráneo báquiro (*Tayassu tajacu*). Para la reconstrucción de un cráneo de *Tayassu tajacu*, de 52 cm de longitud estándar, en el cual se emplearon 80 fotografías de 10 Mpx, fue necesario un total de 24 minutos para la obtención de una nube de puntos 3D densa. El total de puntos de la nube fue de 185.428. En la Figura 4 se muestra el producto de la reconstrucción.



Figura 4. Modelo 3D de cráneo de báquiro (*Tayassu tajacu*)

Se puede observar claramente la existencia de numerosos puntos que no pertenecen a la superficie del cráneo, los cuales corresponden a elementos del fondo utilizado. Este fenómeno es consecuencia de la detección de puntos 3D en la superficie que sirve de apoyo al objeto de reconstrucción. Para este caso específico, el uso de fotografías de mayor resolución aumenta la sensibilidad del algoritmo a la detección de elementos que luego serán representados como puntos 3D. También juega un papel importante la opacidad de la superficie; si la misma no es totalmente mate, reflejará parte de la luz incidente y creando puntos iluminados que serán detectados en la reconstrucción.

Estos puntos que no pertenecen a la superficie pueden ser removidos semiautomáticamente en Meshlab, mediante filtros de selección por color. Sin embargo, el tiempo que se requiere para este proceso excede por mucho al equivalente a recapturar las imágenes para una nueva reconstrucción 3D de mejor calidad. Vale la pena mencionar que no es posible generar una reconstrucción de superficie a partir de una nube de puntos 3D con tanto nivel de elementos ruidosos. Por esta razón no se procedió a la creación de una superficie para este modelo en particular.

Caparazón de tortuga (*Eretmochelys imbricata*). En la reconstrucción del modelo 3D para el caparazón de tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*), fue necesario un total de 31 minutos, obteniéndose una nube densa de 1.113.270 puntos y una superficie 65.000 triángulos. El modelo obtenido se muestra en la Figura 5, con visualización de la textura ya proyectada sobre la superficie resultante.



Figura 5. Modelo 3D de caparazón de tortuga (*Eretmochelys imbricata*).

Se observa que el nivel de la reconstrucción cubre hasta parte del fondo sobre el cual estaba apoyado el objeto. Aunque la resolución de las fotografías de entrada es similar al de las empleadas en la reconstrucción del cráneo de *T. tajacu*, la calidad – en términos cualitativos y cuantitativos - del modelo obtenido en este caso es muy superior. Para el caparazón de tortuga fue posible obtener una superficie bastante continua y completa, con una coloración de la misma casi perfecta.

La principal diferencia reside en que la iluminación la cual, para este caso, fue más homogénea, sin contrastes abruptos ni alto nivel de ruido. Cabe recordar que para imágenes muy oscuras, las fotografías suelen resaltar el ruido térmico propio de los sensores de las cámaras fotográficas. Este ruido se manifiesta en la forma de píxeles con un color distinto del negro (típicamente rojo), creando falsos positivos en la detección. En escenas como la del caparazón de tortuga, donde el nivel de iluminación es alto, dicho nivel de ruido es despreciable.

Colonias de coral. Para la reconstrucción 3D de colonias de coral, se utilizaron como objetos a 3 ejemplares pertenecientes a 3 especies de corales escleractínidos, tanto macizos como ramificados. Las especies en cuestión son: *Acropora palmata*, *Dendrogyra cylindrus* y *Diploria* sp. Para cada una de las colonias se muestran las reconstrucciones obtenidas, tanto la malla de superficie como modelo el denso sin y con textura. En las Figuras 6, 7 y 8 se muestran respectivamente, cada una de las especies antes mencionadas.

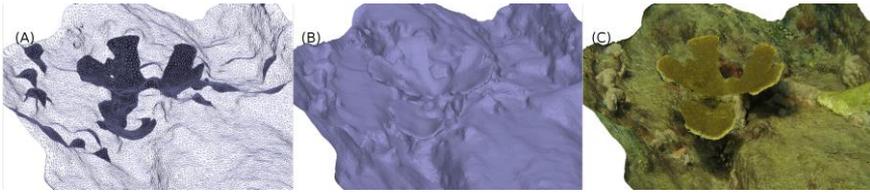


Figura 6. Reconstrucción de colonia de *Acropora palmata*. (A) Superficie mallada, (B) Superficie sólida, (C) Superficie con textura.

El modelo 3D para la colonia de *A. palmata* consta de un total de 822.701 puntos y 45.000 triángulos para la superficie. En la Figura 6c se puede apreciar claramente el nivel de detalle de la reconstrucción con textura, distinguiéndose la sobre-proyectada por la colonia en el sustrato. Este tipo de fenómenos son parcialmente controlables mediante la inclusión de fuentes de iluminación artificiales. Sin embargo, a efectos de análisis de superficie y rugosidad de la colonia, no tiene mayor incidencia y puede ser ignorado. Este tipo de colonia pertenece a la clase de corales ramificados, que exhiben unas de las mayores complejidades estructurales.

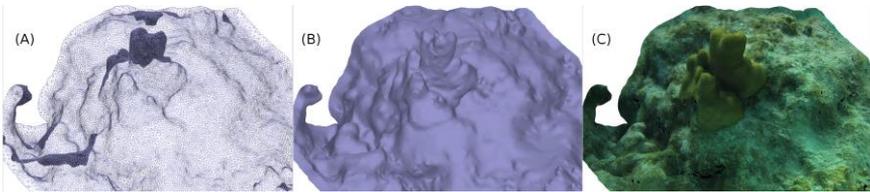


Figura 7. Reconstrucción de colonia de *Dendrogyra cylindrus* (A) Superficie mallada, (B) Superficie sólida, (C) Superficie con textura.

La reconstrucción de la colonia de *Dendrogyra cylindrus*, ilustrada en la Figura 7A, consta de un total de 708.944 puntos, y 50.000 triángulos de superficie. Al igual que para el caso de la colonia de *A. palmata*, se observa el fenómeno de la sombra proyectada por la colonia, pero en un menor grado. Es necesario destacar que la superficie de esta especie de coral no es exactamente plana, puesto que los pólipos suelen estar desplegados en plena luz del día, confiriéndole una textura no lisa.

La calidad de la reconstrucción 3D permite efectuar mediciones que tomarían mucho tiempo en campo. Ejemplo de ello, es que conociendo la altura de uno de los pilares (columnas) de la colonia, es posible calibrar y medir el resto de los pilares; así como también medir la distancia entre los topos de los mismos, superficie, volumen encerrado, etc.

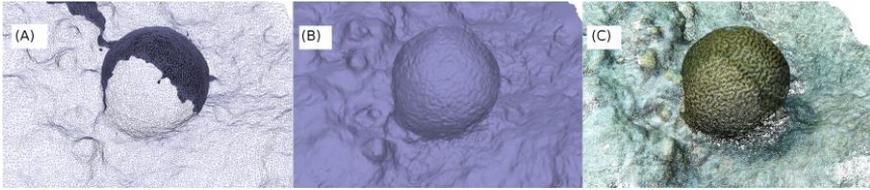


Figura 8. Reconstrucción de colonia de *Diploria* sp. (A) Superficie mallada, (B) Superficie sólida, (C) Nube densa 3D.

El modelo 3D obtenido para la colonia de *Diploria* sp. consta de un total de 534.419 puntos, y 45.000 triángulos de superficie. En este caso, al igual que en los dos anteriores, el modelo obtenido de superficie ofrece un nivel de detalle bastante alto. En la Figura 8B se puede llegar a detallar las convoluciones de los valles que forman los pólipos interconectados. A partir de esta reconstrucción se puede estimar el cociente de rugosidad de la superficie, volumen de la colonia, distancia entre valles, longitud y nivel de curvatura de valles, entre otras.

Es necesario mencionar que para todas las reconstrucciones de colonias de coral, la calidad de la reconstrucción estuvo fuertemente vinculada con la calidad de las imágenes de entrada. Debido a la dificultad del trabajo en campo requerido para la captura de este tipo de imágenes y el costo asociado al tiempo necesario, resulta imprescindible capturar suficientes imágenes que cubran las distintas caras de la colonia. El impacto de la presencia de elementos móviles, tales como peces, algas, corales blandos y/o partículas en suspensión, puede ser minimizado mediante la redundancia de las imágenes adquiridas.

DISCUSIÓN

La utilización de la técnica conocida como *Structure from Motion* permite la construcción de modelos tridimensionales de distintos organismos y estructuras como colonias de coral, caparazones de tortugas, conchas de bivalvos, cráneos de báquiros o de delfín, por citar algunos ejemplos. Estos modelos tridimensionales permiten la estimación de parámetros que reflejan la complejidad estructural, la heterogeneidad y las relaciones morfométricas. La estimación de este tipo de parámetros puede ser costosa, difícil de medir y demanda una gran cantidad de tiempo el explorar otras técnicas para realizar las medidas.

Particularmente en cráneos, conchas, caparazones o cualquier carácter morfológico de las especies, la morfometría geométrica permite visualizar diferencias entre distintas formas biológicas, junto con la puesta a prueba

de distintas hipótesis estadísticas, sustentadas firmemente en una base matemática adecuada (Zelditch *y col.*, 2004). Entre los diferentes estudios que se pueden realizar están los trabajos en ontogenia, la cual comprende las modificaciones que ocurren en un individuo desde el cigoto hasta el estadio adulto, e incluye los procesos de crecimiento (aumento de tamaño), desarrollo (diferenciación) y madurez (envejecimiento biológico) (Gould, 1977). Su estudio es importante para entender las relaciones entre forma y función en contextos ecológicos, de desarrollo y evolutivos (Cardini y Thorington, 2006; Franklin *y col.*, 2006 y Jones *y col.*, 2013). Otro tipo de estudios que se pueden realizar son los de dimorfismo sexual, la cual es una de las fuentes más notables y generalizadas de la variación fenotípica, (Fairbairn y Preziosi, 1996; Rosas y Bastir, 20002). Las diferencias sexuales apreciables en los caracteres morfológicos de machos y hembras son un fenómeno común en muchos taxa de animales, siendo más conspicua la variación en el tamaño y la forma del cuerpo (Galdames y Zavando, 2012). La información determinada a partir de los estudios morfométricos puede permitir diferenciar entre especies, entre sexos, entre estadios de vida o entre subespecies.

Por último y, tomando en cuenta una aplicación más orientada al área de ecología, consiste en el posible efecto que tengan organismos proveedores de hábitat como los corales sobre el resto de las poblaciones que habitan en los ambientes coralinos. Estos proveen de una estructura en la cual se pueden refugiar y por ello características físicas de las colonias de coral como el tamaño, o la complejidad estructural pueden tener un papel determinante sobre la estructura de comunidades asociadas como los peces e invertebrados móviles. La utilización de reconstrucciones tridimensionales permite estimar múltiples variables que pueden ser utilizadas como proxies de complejidad estructural, como son la cantidad o densidad de ramas de una colonia, la superficie o el volumen de una colonia (Agudo-Adriani *y col.*, 2016; Lavy *y col.*, 2015). Estudios han probado la validez de las medidas de superficie y volumen a partir de medidas hechas a colonias removidas en el campo (Courtney *y col.*, 2007; Lavy *y col.*, 2015; Ferrari *y col.*, 2016). Igualmente el uso de modelos 3D ha probado su efectividad para medir estructuras pequeñas que permitan la identificación taxonómica como los cálices de algunas colonias (Gutierrez-Heredia *y col.*, 2015). Aproximaciones similares podrían ser seguidas para determinar la relación entre otros organismos proveedores de hábitat en ecosistemas marinos como las selvas de kelps, las raíces de manglares o árboles y arbustos en ambientes terrestres.

El presente estudio definió una serie de pasos a ser seguidos para realizar reconstrucciones tridimensionales de diferentes estructuras (caparazones y cráneos) y organismos (colonias de coral), estableciendo las ventajas y desventajas de seguir diferentes aproximaciones. La utilización de este tipo de técnica provee de una alternativa a los métodos tradicionales de mediciones morfométricas con ventajas como el costo, la rapidez para la adquisición de los datos y el hecho de que no involucra la manipulación

directa de los organismos. Consideramos que sus aplicaciones dentro de la morfometría son numerosas y que estarán limitadas a las preguntas establecidas en cada estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecemos a la Fundación para la Defensa de la Naturaleza (FUDENA - Chichiriviche), y en especial a Samuel Narciso y Alfredo Romero, por el apoyo brindado en la obtención de modelos 3D de tortuga. También agradecemos al Museo Estación Biológica Rancho Grande (P.N. Henri Pittier), por permitir el uso de ejemplares de cráneos para los modelos de *Tayassu tajacu*.

LITERATURA CITADA

- Adams, D.C., y D.J. Funk. 1997. Morphometric inferences on sibling species and sexual dimorphism in *Neochlamisus bebbianae* leaf beetles: multivariate applications of the thin-plate spline. *Syst. Biol.* 46(1):180-94.
- Adams, D.C., F.J. Rohlf y D.E. Slice. 2004. Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. *Ital. J. Zool.* 71:5-16.
- Adams, D.C.; F.J. Rohlf y D.E. Slice. 2013. A field comes of age: geometric morphometrics in the 21st century. *Hystrix* 24 (1):7-14.
- Agudo-Adriani, E. A., J. Cappelletto, F. Cavada-Blanco y A. Croquer. 2016. Colony geometry and structural complexity of the endangered species *Acropora cervicornis* partly explains the structure of their associated fish assemblage. *PeerJ* 4, e1861.
- Bookstein, F.L. 1998. A hundred years of morphometrics. *Acta Zool. Hung.*, 44: 7-59.
- Burns, J.H. R., D. Delparte, R.D. Gatesy M. Takabayashi. 2015. Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. *PeerJ* 3, e1077.
- Cantín, M., G. Salgado, O. Inzunza, V. Inostroza, M.J. Errázuriz, C. Pavez, y R. Fuentes. 2013. Direct morphometric evaluation of condylar asymmetry on human mandibles. *Int. J. Morphol.*, 31 (4):1401-1406.
- Cardini, A. y R.W. Thorington. 2006. Postnatal ontogeny of marmot (*Rodentia*, *Sciuridae*) crania: allometric trajectories and species divergence. *Journal of Mammalogy* 87(2):201-215.
- Cignoni, P., M. Callieri, M. Corsini, M. Dellepiane, F. Ganovelli y G. Ranzuglia. 2008. Meshlab: an open-source mesh processing tool (129-136). En: Eurographics Italian Chapter Conference (Scarano, V., R. De Chiara y U. Erra, Eds.). Proc. Eurographics Italian Chapter Conference.
- Cocito, S., S. Sgorbini, A. Peirano y M. Valle. 2003. 3-D reconstruction of biological objects using underwater video technique and image processing. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 297(1):57-70.
- Courtney, L.A., W.S. Fisher, S. Raimondo, L.M. Oliver y W.P. Davis. 2007. Estimating 3-dimensional colony surface area of field corals. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 351(1):234-242.
- Fairbairn, D.J. y R.F. Preziosi. 1996. Sexual selection and the evolution of sexual size dimorphism in the water strider, *Aquarius remigis*. *Evolution* 50(4):1549-1559.

- Ferrari, R., D. McKinnon, H. He, R.N. Smith, P. Corke, M. González-Rivero,... y B. Uproft. 2016. Quantifying Multiscale Habitat Structural Complexity: A Cost-Effective Framework for Underwater 3D Modelling. *Remote Sensing* 8(2):113.
- Franklin, D., L. Freedman, N. Milne y C.E. Oxnard. 2006. A geometric morphometric study of sexual dimorphism in the crania of indigenous southern Africans. *South African Journal of Science* 102:229-238.
- Galdames, I.S. y D. Zavando. 2012. Age effect in the morphological traits performance for sex determination in human skulls and mandibles. *Int. J. Morphol.* 30(1):296-301.
- Giannini, N.P., V. Segura, M.I. Giannini y D.A. Flores. 2010. A quantitative approach to the cranial ontogeny of the puma. *Mamm. Biol.* 75(6):547-554.
- Gutiérrez-Heredia, L., C. D'Helft, y E.G. Reynaud. 2015. Simple methods for interactive 3D modeling, measurements, and digital databases of coral skeletons. *Limnology and Oceanography: Methods* 13(4):178-193.
- Gould, S.J. 1977. Ontogeny and phylogeny. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Jones, K. E., C.B. Ruff y A. Goswami. 2013. Morphology and biomechanics of the pinniped jaw: mandibular evolution without mastication. *Anat. Rec.* 296(7):1049-1063.
- Kark, S. 2001. Shifts in bilateral asymmetry within a distribution range: the case of the chukar partridge. *Evolution* 55:2088-2096.
- Kwasnitschka, T., T.H. Hansteen, C.W. Devey y S. Kutterolf. 2013. Doing fieldwork on the seafloor: photogrammetric techniques to yield 3D visual models from ROV video. *Comput. Geosci.* 52:218-226.
- Lavy, A., G. Eyal, B. Neal, R. Keren, Y. Loya y M. Ilan. 2015. A quick, easy and non-intrusive method for underwater volume and surface area evaluation of benthic organisms by 3D computer modelling. *Methods in Ecology and Evolution* 6(5):521-531.
- Lens, L., S. Van Dongen y E. Matthysen. 2002. Fluctuating asymmetry as an early warning system in the critically endangered Taita thrush. *Conservation Biology* 16(2):479-487.
- Monteiro-Filho, E.L., L.R. Monteiro y S.F. dos Reis. 2002. Skull shape and size divergence in dolphins of the genus *Sotalia*: a tridimensional morphometric analysis. *Journal of Mammalogy* 83(1):125-134.
- Palmer, A.R. 1996. Waltzing with asymmetry. *BioScience* 46(7):518-532.
- Rohlf, F.J. y L.F. Marcus. 1993. A revolution in morphometrics. *Trends Ecol. Evol.* 8(4):129-132.
- Rosas, A. y M. Bastir. 2002. Thine-plate Spline Analysis of allometry and sexual dimorphism in the human cranofacial complex. *American Journal of Physical Anthropology* 117:236-245.
- Segura, V. y F. Prevosti. 2012. A quantitative approach to the cranial ontogeny of *Lycalopex culpaeus* (Carnivora: Canidae). *Zoomorph.* 131:79-92.
- Snaveley, N., S.M. Seitz y R. Szeliski. 2008. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80:189-210.
- Wu, C. 2011. VisualSFM: A visual structure from motion system. Publicación electrónica: <http://ccwu.me/vsfm/doc.html>.
- Zelditch, M.L., D.L., Swiderski, H.D. Sheets y W.L. Fink. 2004. *Geometric Morphometrics for Biologists*. A Primer. Elsevier.