

Aplicaciones fotogramétricas digitales en el análisis morfométrico de fósiles

J. E. Caracuel⁽¹⁾, J. Cardenal⁽²⁾ y J. Delgado⁽²⁾

(1) Dpto. Ciencias de la Tierra, Univ. Alicante. Apdo. 99, 03080 San Vicente del Raspeig, Alicante.
E-mail: Jesus.Caracuel@ua.es

(2) Dpto. Ing. Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Univ. Jaén. C/ Virgen de la Cabeza 2, 23071 Jaén.
E-mail: jcardena@ujaen.es - jdelgado@ujaen.es

RESUMEN

Se presenta un método fotogramétrico de bajo coste y rápida ejecución para realizar modelos digitales 3D que permitan obtener información morfométrica de fósiles. Las imágenes iniciales son tomadas con cámara convencional de 35mm, previamente calibrada, digitalizadas en un escáner de sobremesa y almacenadas en formatos TIFF o JPEG. Todo el proceso fotogramétrico se realiza enteramente bajo plataforma PC, con lo que se evita el empleo de instrumental fotogramétrico específico. A partir de una nube de puntos medidos (mediante fotogrametría) sobre el fósil se puede llevar a cabo el análisis dimensional cuantitativo y la definición de parámetros y relaciones paramétricas del fósil.

Las principales aplicaciones paleontológicas de la generación de modelos digitales 3D se relacionan con la agilización del proceso de medida y análisis de la forma, en el apoyo a las modelizaciones matemáticas y la reconstrucción virtual (animaciones 3D) de los restos.

Palabras clave: fotogrametría digital, modelos 3D, morfometría de fósiles

Digital photogrammetric applications in morphometric fossil analysis

ABSTRACT

It is presented a low-cost and low time-consuming photogrammetric method to obtain digital 3D models and morphometric information of fossils. The original images were obtained with a previously calibrated conventional 35mm camera, digitized on desktop scanner and stored on TIFF or JPEG format. The photogrammetric treatment was done under conventional PC, which avoid using specialized photogrammetric instruments. The point cloud measured (by means of photogrammetry) on the fossil permit the dimensional analysis and the definition of the metric parameters which characterize the fossil shape.

Main applications in paleontology of digital 3D models are the improvement of fossil measurement to favor dimensional analysis, the support for the mathematical modelization and the virtual reconstruction (3D animation) of the fossil remains.

Key words: digital photogrammetry, fossil morphometry, 3D models

Introducción

La gran capacidad de gestión de información de los sistemas informáticos ha sido principalmente aplicada en paleontología para el tratamiento estadístico de datos en interpretaciones evolutivas y taxonómicas. Esta alta velocidad de gestión de datos también ha facilitado la deducción de procesos a partir de hipótesis (simulaciones por medio de modelos matemáticos), que pueden ser comparados con los datos empíricos. Un reto de futuro significativo en paleontología es la adquisición eficiente de información morfológica y morfométrica de restos fósiles utilizando siste-

mas automáticos de visión (Kitchell, 1990), escáner 3D (ver las páginas Web; Computational Paleontology, The Digital Biology Project, The Natural History Museum y Caracuel *et al.*, 2001), fotografías analógicas procesadas y escaneadas (Caracuel *et al.* 1999 y Cardenal, *et al.* 2001), imágenes digitales, de vídeo (videogrametría) o tomografías computerizadas (Arsuaga 1999).

La morfometría de fósiles, definida por Bookstein *et al.* (1985) como "el análisis de las homologías biológicas y de los cambios geométricos", es fundamental en el estudio de las trayectorias filogenéticas y ontogenéticas. De acuerdo con Kitchell (1990), los

análisis morfométricos de precisión son indispensables en la mayoría de los campos de investigación en paleontología, como son los estudios sobre heterocronías y los modelos evolutivos anagenéticos/cladogenéticos. Además de estas aplicaciones en evolución orgánica, los análisis dimensionales de precisión en paleontología son determinantes (Raup, 1966; Meinhardt, 1995), tanto para estudios de morfología funcional de fósiles como para los análisis morfométricos con interés sistemático.

Las técnicas fotogramétricas digitales constituyen una metodología valiosa para la reconstrucción morfológica y la caracterización métrica de objetos, que ha sido escasamente aplicada en ciencias de la tierra y especialmente en paleontología. Esto ha sido debido a la complicada ejecución del proceso, que requiere del uso de *software* y *hardware* específico, costoso y desconocido en gran medida, para los investigadores en paleontología. Sin embargo, en la actualidad, la simplificación y reducción de coste de los programas de modelización 3D en entornos gráficos de generalizada utilización (Windows) ha favorecido el acceso a estas técnicas.

Aplicaciones fotogramétricas en Paleontología

En la introducción se han comentado diferentes técnicas válidas para la obtención de modelos 3D. Dentro de éstas, la fotogrametría es una técnica de obtención de información dimensional de objetos a partir de las medidas sobre imágenes adquiridas con diferentes tecnologías (vídeo, cámaras fotográficas convencionales o CCD, holografía, S.E.M., etc.; Wolf, 1983). Uno de los principios fundamentales de la fotogrametría es la triangulación. Así, a partir de foto-

grafías tomadas desde, al menos, dos posiciones diferentes se pueden establecer las líneas que unen puntos del objeto 3D con sus correspondientes homólogos en las imágenes. Si se calcula la intersección analítica de estas líneas, llamadas rayos o haces, se determinarán las coordenadas 3D de los puntos de interés del objeto. Este proceso conlleva, en primera instancia, el paso desde el espacio 3D real al sistema 2D imagen (toma de las fotografías) y, posteriormente, el cálculo analítico que supone la triangulación convierte las imágenes 2D en un modelo 3D ajustado en escala real o arbitraria (Fig. 1).

Tanto en los estudios fotogramétricos como de análisis de imágenes digitales, la toma de fotografías y su procesado (escaneado y exportación en el formato apropiado para el *software* disponible), consume un coste en tiempo que ha de ser rentabilizado, posteriormente, en el proceso. Actualmente este consumo de tiempo se ha reducido sensiblemente con la incorporación de cámaras digitales que agilizan el proceso de captura de información, además de la simplificación del software de modelado 3D a partir de imágenes. En consecuencia, el tratamiento fotogramétrico de las imágenes de fósiles para la obtención de medidas se revela rentable en coste económico y tiempo en múltiples aplicaciones.

Los métodos tradicionales de medición lineal y areal en paleontología (calibres de precisión, reglas, retículos graduados) son suficientemente eficientes en la mayoría de los casos. Sin embargo, existen aplicaciones donde la medición directa se dificulta por: la precisión requerida debe ser máxima; los tamaños de los fósiles inapropiados; el gran número de medidas a realizar ralentiza en exceso el proceso manual; necesidad de obtención de coordenadas 3D; medición de superficies o longitudes sobre curvas.

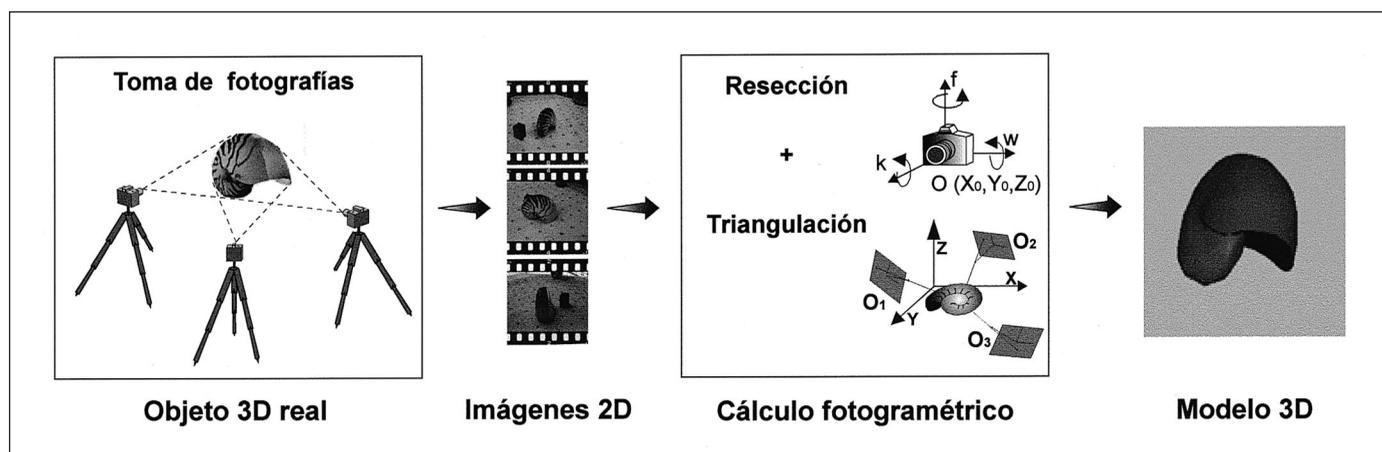


Fig. 1. Diagrama de flujo del proceso fotogramétrico de obtención de modelos digitales 3D
 Fig. 1. Photogrammetric flow diagram for obtaining 3D models

Las mediciones de restos paleontológicos pueden ser obtenidas a partir de una sola imagen digital de fotoescala conocida, equivalente a las realizadas para llevar a cabo análisis de imágenes convencional. No obstante, sobre una sola imagen únicamente se conocen 2 dimensiones, y la carencia de control preciso sobre la perspectiva de la imagen y la escala variable dentro del campo fotográfico limitan en gran medida las posibilidades métricas de precisión. Una solución a este problema es la generación de modelos digitales 3D a partir de múltiples fotografías convergentes. Las principales aplicaciones en paleontología de la generación de modelos digitales 3D por métodos fotogramétricos se fundamentan en la agilización del proceso de medida, en el apoyo a las modelizaciones matemáticas y la reconstrucción virtual de los restos.

Estos modelos digitales 3D de restos paleontológicos favorecen una rápida comparación morfológica y morfométrica tridimensional de los fósiles, útiles en aplicaciones taxonómicas y para caracterizar trayectorias evolutivas. También se han aplicado los programas de análisis de imágenes al estudio morfológico de foraminíferos con interés bioestratigráfico (ver *Optimas home page*). Este tipo de aplicaciones puede implementar programas informáticos de identificación automática de fósiles tanto en 2D, sobre lámina delgada y secciones pulidas (Riedel 1989) como en 3D.

Una aplicación particularmente interesante la constituye la morfometría de precisión sobre restos de tamaño excesivamente grande (megafósiles o yacimientos paleontológicos), o pequeño (aplicaciones fotogramétricas bajo microscopio óptico convencional y S.E.M. en microfósiles), que dificulte, o imposibilite, la realización de medidas convencionales.

De especial relevancia son las aplicaciones de los modelos tridimensionales digitales de fósiles para apoyar las modelizaciones matemáticas. La caracterización morfológica de fósiles, favorecerá estudios sobre morfología funcional (características aerohidrodinámicas, modelos de flotabilidad, estabilidad, resistencia y crecimiento de estructuras, etc.), y de estructuras constructivas de los fósiles. Las modelizaciones matemáticas tridimensionales, pueden ser complementadas con la incorporación al modelo matemático de las características de textura y composición de los materiales que lo forman, posibilitando un tratamiento de las simulaciones más realístico.

Otros usos de los modelos digitales 3D se centran en la posibilidad de reconstrucción (virtual) de las partes no conservadas de los ejemplares, cuando se disponga de esa información (laguna) en otros restos fósiles. De este modo se puede obviar las pérdidas de

información debidas a procesos tafonómicos destructivos sobre los restos, que en ocasiones limitan su tratamiento taxonómico. De igual modo pueden ser corregidas sobre el modelo 3D las distorsiones (aplastamiento, fractura) que habitualmente afectan a los fósiles. En aplicaciones a estudios evolutivos son relevantes las modelizaciones de taxones intermedios virtuales (no obtenidos en el registro fósil) a partir de los modelos digitales de los taxones conocidos en una línea filogenética.

En última instancia, la obtención de un documento digital que representa al resto fósil permitirá la creación de bases de datos de modelos digitales 3D para fósiles de referencia (holotipos), con toda la información morfométrica y textural (patrones de color, rugosidad de las superficies) requerida para un adecuado análisis taxonómico. Esto favorecerá un rápido, cómodo y económico modo de intercambio de información entre la comunidad científica vía Internet. Los organismos encargados de gestionar las bases de datos (museos, departamentos, centros de investigación) podrían disponer de direcciones *web* de libre acceso donde se pueda acceder a los fósiles de referencia. De acuerdo con las posibilidades anteriormente señaladas, estos holotipos pueden ser implementados con la información proveniente de sus respectivos paratipos, para configurar un único documento digital de referencia del taxón.

Las técnicas de modelado tridimensional por métodos fotogramétricos pueden ser aplicadas a la caracterización de afloramientos y yacimientos paleontológicos, de modo equivalente a las aplicaciones arqueológicas, donde están más desarrolladas. En este caso, además de un método preciso de seguimiento de la excavación, el modelo digital del yacimiento, permitiría la generación de animaciones 3D de los yacimientos, con aplicaciones divulgativas, didácticas y/o museológicas.

Metodología fotogramétrica

La toma de imágenes en fotogrametría requiere, por lo general, de una instrumentación costosa. Las cámaras habitualmente utilizadas son métricas (geometría interna conocida, especialmente la distancia focal) y de gran calidad óptica, prácticamente libre de aberraciones y distorsión. En este trabajo, se propone el empleo de cámaras no métricas, bien convencionales o digitales. El problema que supone el desconocimiento de su geometría interna o la existencia de distorsión óptica, puede ser resuelto con la calibración de la cámara mediante fotografías a un patrón de dimensiones conocidas (ver Atkinson, 1996, para un tratamiento extenso).

A diferencia de lo que sucede con los métodos fotogramétricos clásicos basados en la toma de pares estereoscópicos, la metodología propuesta requiere fotografías tomadas con cierta inclinación entre sí (fotografías convergentes). Ello asegura una geometría entre haces homólogos más favorable para un correcto cálculo 3D. Como norma general, se establece que cuanto más próximos a 90° sean los ángulos de intersección entre los distintos ejes ópticos de las diferentes tomas, más preciso será el cálculo de la intersección.

Trabajando con técnicas digitales, la medida de la fotografía puede realizarse directamente en el ordenador, con lo que se evita el uso de instrumentos especiales de precisión micrométrica (restituidor fotogramétrico y comparadores). El empleo de técnicas de análisis de imagen supone que la fotografía debe ser digitalizada, a no ser que haya sido directamente adquirida en formato digital con una cámara digital o CCD. Los puntos en la imagen podrán ser medidos en un sistema 2D, y les serán asociadas unas determinadas coordenadas *píxel* (fila y columna en el fichero imagen correspondiente).

Una vez realizadas las fotografías se deben medir los puntos característicos. Tales puntos deben ser claramente identificables, dado que se carece de visión estereoscópica, y aparecer en dos o más imágenes (Karara 1989). Es aconsejable que el punto aparezca en un mínimo de tres fotografías para mantener un equilibrio entre precisión (teóricamente cuantos más rayos homólogos interseccionen en un punto mayor precisión podrá alcanzarse) y el manejo de un número razonable de imágenes y datos. Los puntos a medir pueden ser detalles naturales bien definidos (bordes, espinas, intersecciones de líneas de crecimiento con patrones de color, etc.) o marcados previamente sobre el objeto, si ello fuese necesario. Una técnica alternativa es la proyección de patrones de marcas o puntos sobre el objeto en el momento de la toma, de forma que para el tratamiento posterior se disponga de un número suficiente de puntos a medir sin necesidad de manipular el objeto.

Tras la obtención de los datos se prosigue con la fase del cálculo. Existen diversos métodos analíticos de los cuales los más sencillos son aquellos basados en el cálculo de la resección y la triangulación. La resección es el procedimiento que permite estimar la posición y orientación de la cámara en el momento que se tomó la fotografía (Fig. 1 y 2). Una vez conocidas las condiciones geométricas de las tomas, las coordenadas tridimensionales de los puntos de interés sobre el objeto, los cuales permitirán definir posteriormente el modelo 3D, se resolverán por triangulación.

Para el cálculo de la resección espacial, se requieren puntos del objeto (denominados puntos de

apoyo), en los que se conocen sus coordenadas en un sistema 3D, que puede ser arbitrario. De forma alternativa (o adicionalmente), se pueden usar líneas de dimensiones y direcciones conocidas que permitan definir los ejes de coordenadas. La posición de la cámara puede establecerse, mediante técnicas de geometría perspectiva, basándose en la fuga de líneas que sean paralelas y perpendiculares entre sí (Williamson & Brill, 1990). En otras ocasiones, se puede aplicar la condición de colinealidad (Ghosh, 1987), que establece que el punto en la imagen, el centro perspectivo de la cámara y el punto en el objeto (cuyas coordenadas 3D sean conocidas) se sitúan sobre una línea recta. Los datos básicos para estimar la resección pueden obtenerse fácilmente, si el objeto es lo suficientemente pequeño, fotografiándolo sobre un panel con puntos y líneas marcadas. En otras ocasiones, basta la toma de medidas con flexómetro sobre el objeto y/o su entorno. Si no fuese posible esto, siempre se pueden proporcionar coordenadas 3D en puntos de apoyo mediante técnicas topográficas clásicas, si bien el método se encarece y complica.

Una vez calculada la resección en las diferentes tomas, el proceso de triangulación estimará las coordenadas 3D de todos los puntos de interés del objeto que definirán el modelo 3D final. Para esta fase del trabajo se deben identificar puntos homólogos del objeto (mismo punto en varias imágenes) situados en zonas clave de éste, de forma que permitan definir su geometría. El cálculo se hace por intersección espacial. Esto es, los rayos homólogos del mismo punto en diferentes fotografías se cortan en su posición correcta en el espacio, lo que proporciona sus coordenadas 3D (figura 1: cálculo fotogramétrico). Las ecuaciones que permiten obtener dichas coordenadas XYZ se pueden encontrar en cualquier texto general de fotogrametría (Atkinson, 1996; Wolf, 1983; o Ghosh, 1987).

Una vez calculadas las coordenadas XYZ de los puntos a partir de las coordenadas 2D-imagen en las diferentes fotografías y la posición y orientación de éstas, se puede reconstruir el modelo 3D. Este modelo 3D puede ser exportado a algún sistema CAD apropiado, donde podrá ser modificado añadiéndole texturas, y obtenerse la información dimensional requerida.

Modelado 3D de fósiles

Toma de fotografías y digitalización

Para ejemplificar el proceso se han elaborado varios modelos tridimensionales sobre restos de cefalópodos, equínidos y trilobites, que cubren una amplia

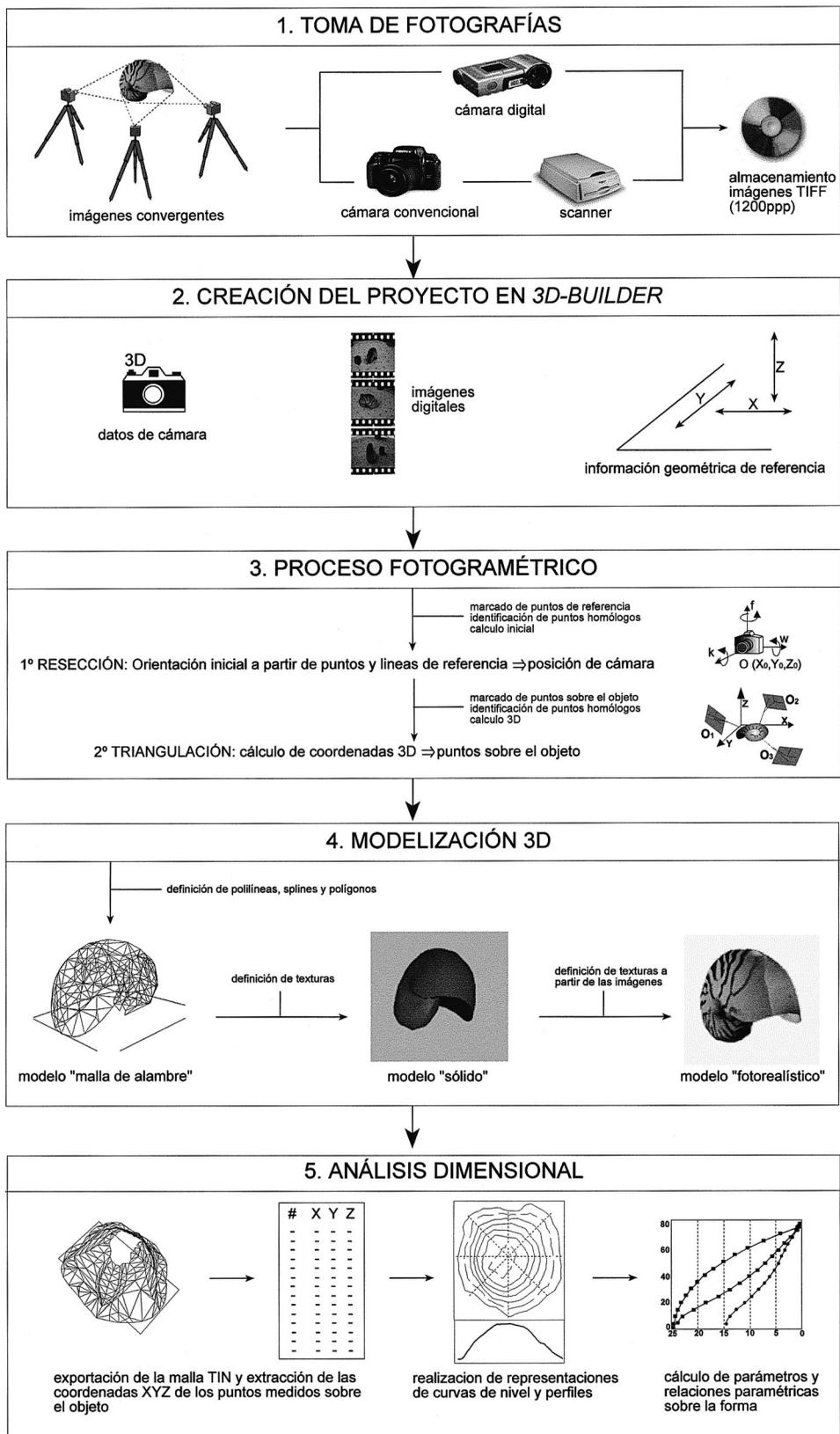


Fig. 2. Curso de las operaciones del proceso fotogramétrico de obtención de modelos digitales 3D con el sistema 3D Builder® 3.0 PRO y posterior análisis dimensional de fósiles
 Fig. 2. Flow diagram for obtaining 3D models with 3D Builder® 3.0 PRO and further dimensional analysis of fossils

gama de morfologías, texturas y tamaños. Los fósiles se fotografiaron sobre un panel milimetrado para facilitar las referencias que permitieron el cálculo de la resección y eventualmente la calibración de la cámara (puntos de control y líneas de referencias según los ejes X-Y). En todos los casos se modeló la superficie completa, lo que requirió en algún caso un elevado número de imágenes (entre 6 y 13 fotografías) alrededor del resto para cubrir todas las zonas desde al menos 3 puntos de vista, siempre con una de ellas suficientemente frontal como para obtener la textura sin excesiva distorsión. En cada caso se buscó una geometría en los ejes ópticos de los disparos convergentes que garantizase el cálculo de la triangulación (lo más próximo posible a 90° entre sí). Además, fue necesario al menos un cambio de posición del fósil para las tomas en zonas ocultas, por lo que el sistema de coordenadas de referencia no pudo ser el mismo para todas las imágenes. Para facilitar la localización de puntos sobre las partes desprovistas de detalles ornamentales o patrones de color (algunas áreas del *Nautilus*) se premarcaron puntos en la superficie con un rotulador indeleble, que sirvieron de referencia.

Los disparos fotográficos fueron realizados con una cámara convencional de 35 mm (RICOH KR 10M) con un objetivo de 50 mm (Rikenon 50:1.7). Se usó película diapositiva de 100 ISO (Fuji Sensia) en condiciones de iluminación homogéneas en todas las fotografías. Este aspecto es importante para las imágenes que vayan a ser empleadas en la extracción de las texturas del modelo 3D. No obstante, estos ficheros imagen pueden ser tratados digitalmente con programas de tratamiento de imágenes (*Corel Photo Paint*®, *Adobe Photoshop*®) a fin de equilibrar sus histogramas y ajustar el tono, brillo e intensidad de color. De este modo se evitan los contrastes bruscos de color en las zonas de conexión de texturas extraídas de distintas imágenes.

Las diapositivas se digitalizaron en un escáner AGFA Horizon Plus a una resolución de 1200 ppp y se almacenaron en formato TIF (Tagged Image File), con un tamaño de archivo en torno a 8Mb. Para reducir el tamaño de las imágenes puede, alternativamente emplearse una resolución inferior de digitalización o un formato de archivo comprimido tipo JPEG. En este último caso, el tamaño del fichero resultante para las imágenes utilizadas en este trabajo sería entre 300 Kb y 1Mb en función del factor de compresión aplicado. Aunque la compresión en formato JPEG deteriora la calidad radiométrica de la imagen, esto no suele ser apreciable a efectos prácticos. La ejecución del proceso se realizó sobre un PC convencional (Pentium® II a 350 Hz y 128 Mb de RAM) bajo Windows 98®.

Medidas y cálculo del modelo 3D

Para simplificar el proceso de cálculo fotogramétrico, se ha empleado el sistema *3D Builder*® 3.0 PRO¹ (Meritt 1997), que permite la creación de modelos 3D a partir de imágenes adquiridas con cámaras fotográficas convencionales, digitales o de vídeo (incorpora también el formato *Kodak Photo CD*™). Otros sistemas comerciales alternativos presentan similares características, e incluso algunos automatismos, de especial interés en la medida e identificación de puntos homólogos en distintas fotografías (*Photomodeler*® Pro 4.0; ver *Photomodeler home page*, *Shape Capture*®; ver *ShapeQuest Inc. home page*). Para más información sobre sistemas fotogramétricos digitales de objeto cercano se remite a la página Web de la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Teledetección (I.S.P.R.S. home page).

De acuerdo con la Figura 2, tras la creación del proyecto y la inclusión de los datos iniciales (Datos de cámara, imágenes digitales y medidas de referencia sobre el objeto) se realiza el cálculo supervisado de la resección (posición y orientación de las tomas) a partir de las líneas de referencia del papel milimetrado sobre el que fueron fotografiados los fósiles (Figs. 3, 4). Sobre este se marcaron líneas de dimensiones conocidas con relaciones recíprocas de paralelismo y perpendicularidad, que sirvieron de ejes de referencia X-Y-Z.

Una vez conocida la posición y orientación de las tomas se procedió a la triangulación de los puntos en el objeto. Se marcaron de 100 a 300 puntos por fósil en al menos 3 imágenes, que ofreciesen perspectivas suficientemente diferentes (Figs. 3, 4). Sobre los puntos calculados se definieron las entidades que mejor se adaptaban a la morfología real del fósil; líneas, polilíneas, *splines*, círculos o polígonos de múltiples lados. Las caras de los polígonos definidos representan la superficie del modelo 3D a escala, que puede ser visualizado en *modo de malla de alambre* (Fig. 3, ventana superior-derecha 3D PREVIEW) o en *modo sólido* (Fig. 4, ventana 3D PREVIEW) con texturas homogéneas propias del sistema. Complementariamente, el modelo sólido se puede texturizar con las imágenes extraídas a partir de las fotografías originales, seleccionando para cada elemento la vista más frontal que garantiza una baja distorsión del modelo fotorrealístico (Fig. 3, ventana inferior-izquierda 3D PREVIEW).

El modelo digital obtenido puede ser exportado para su mejora y edición a los principales sistemas

¹ Desarrollado por 3D Construction Company (U.S.A.) para plataforma PC bajo entorno *Windows*® 95, 98 y NT

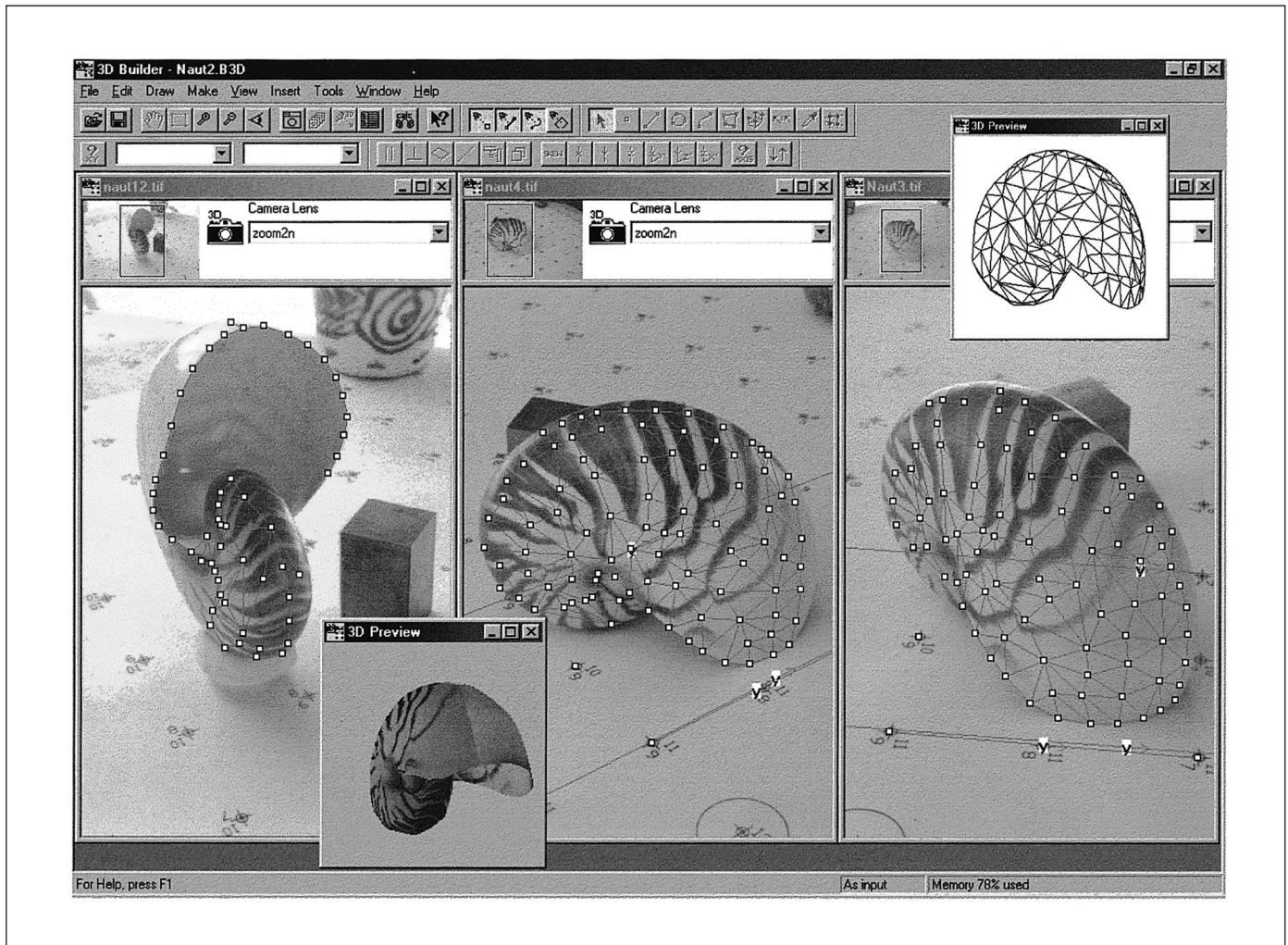


Fig. 3. Modelización 3D de un *Nautilus* con el sistema *PRO 3D Builder® 3.0 PRO*. Las ventanas desplegadas muestran el modelo en malla de alambre (superior-derecha) y fotorrealístico (inferior izquierda). Las líneas definidas en los puntos sobre el papel bajo el fósil sirvieron de referencia para el cálculo de la resección y establecimiento del sistema de coordenadas XYZ

Fig. 3. *Nautilus* modeled with *3D Builder® 3.0 PRO*. Windows (screen captures) show the wireframe (upper right side) and photorealistic (lower left side) models. Lines defined by points targeted in the paper below the fossil allowed the reference spatial coordinate system to solve the resection

CAD (formatos *AutoCad®*, *3D Studio®*, *Inventor*, entre otros) o a visualizadores de tipo *VRML* (por ejemplo, *Cosmoplayer®*, de Computer Associates International, Inc., ver home page) para su difusión en Internet. Las coordenadas XYZ de los puntos materializados en el modelo 3D, así como sus relaciones geométricas pueden ser obtenidas exportando el modelo a un programa CAD. Con ello se puede realizar múltiples representaciones y análisis numéricos de la morfología.

Información morfométrica del modelo 3D

A partir de un fichero en formato DXF, generado por el programa *3D Builder®*, se ha obtenido el listado de

coordenadas XYZ de los puntos materializados sobre el objeto (malla TIN; Fig. 5A), por medio de un programa de desarrollo propio realizado en lenguaje Fortran². Para la representación de curvas de nivel (Fig. 5F) y de los perfiles (Fig. 5J) a partir de los puntos medidos sobre el objeto se puede emplear cualquier programa comercial de representación cartográfica (coordenadas XYZ en formato ASCII). En nuestro caso se ha utilizado para la representación de curvas de nivel el programa *SURFER®* empleando el método de triangulación por interpolación. Para optimizar la representación se ha utilizado una equidis-

² Este programa, bajo MSDOS, queda a libre disposición mediante solicitud a los autores

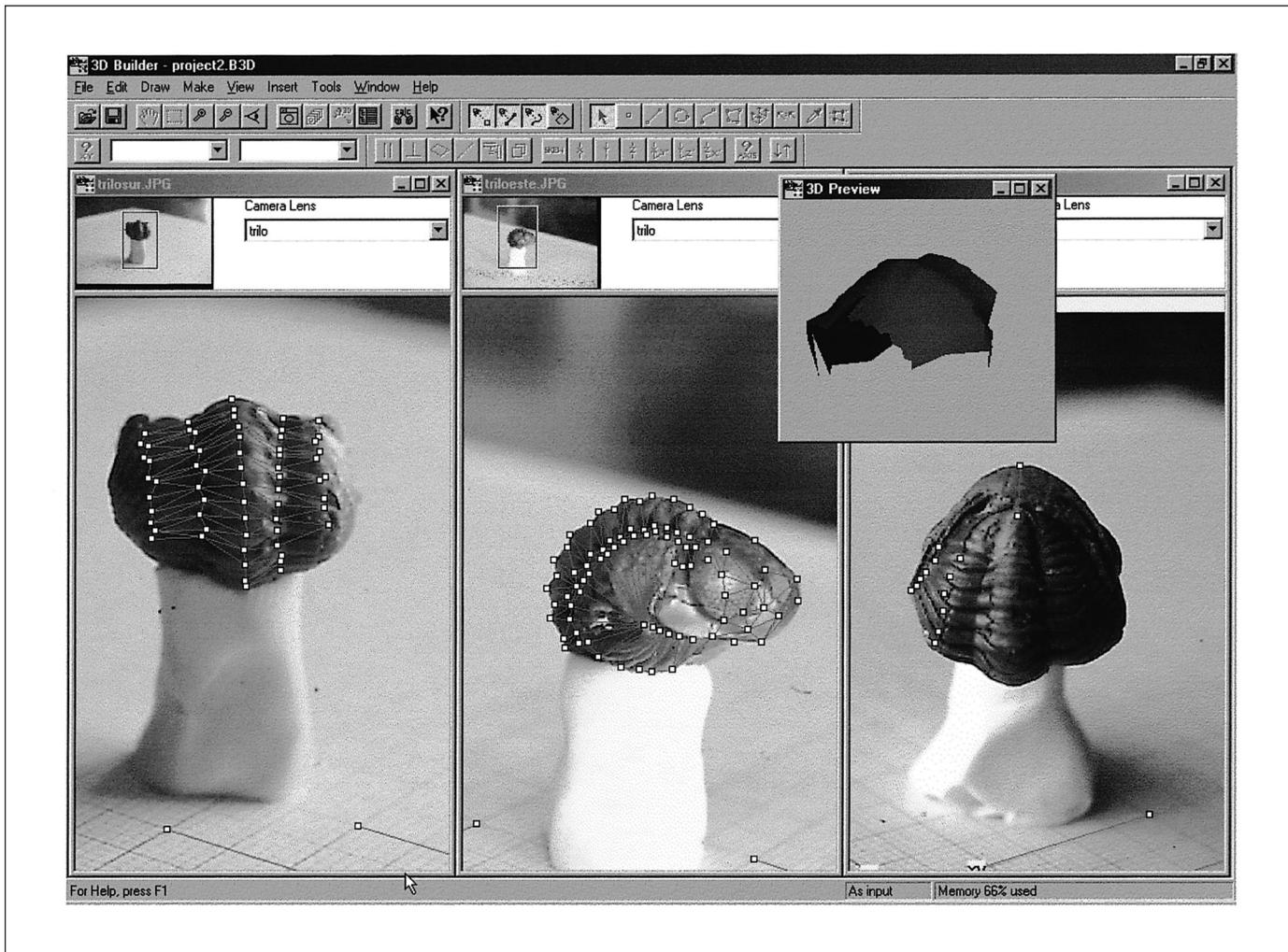


Fig. 4. Modelización 3D de un Trilobites. Las ventanas desplegadas muestran el modelo sólido (superior-derecha) y las imágenes utilizadas en la modelización (izquierda). Se utilizó el papel milimetrado de la base como referencia para el cálculo de la resección y establecimiento del sistema de coordenadas XYZ

Fig. 4. 3D model of a Trilobite. Windows show the solid model (upper right side) and the images employed in the modelization. Scaled millimetric paper was used as reference to state the spatial coordinate system for solving the resection

tancia de 5mm (Fig. 5F). Así mismo se han realizado perfiles transversales (Fig. 5J) cada 45° a partir del centroide del equinodermo, lo que pone de manifiesto su simetría bilateral y las irregularidades en algunas zonas debidas a deformación (segmentos D y B' de los perfiles D-D' y B-B'; Fig. 5J).

Para evidenciar la precisión del modelo digital generado se han obtenido diversos parámetros sobre su representación en curvas de nivel (Fig. 5F). En la Figura 5E se representa el área (mm²) de la superficie real del equinodermo y el área reducida para distintas secciones horizontales consideradas. La diferencia entre ambas pone de manifiesto la evolución de la curvatura del equinodermo, que desde la base evoluciona con un perfil ligeramente cóncavo a fuertemente convexo en la parte superior. De acuerdo con esto,

en la Figura 5G se representa la evolución del volumen positivo (mm³) encerrado a distintas alturas, que muestra un crecimiento más intenso en la base y ralentizado hacia la parte superior.

Otros parámetros y relaciones paramétricas consideradas han sido la distancia máxima/mínima (Fig. 5H) y el coeficiente de forma expresado en % (Fig. 5I). Para ello se parte de la representación de curvas de nivel (equidistancia=10mm), de las cuales se extrae las coordenadas reales planimétricas XY. Posteriormente se calcula el centroide como la media de las coordenadas de los puntos que conforman la curva de nivel (X_c, Y_c). A partir de esta información la Figura 5H representa la relación entre la distancia al punto de máxima separación del centroide respecto al de mínima distancia (DIST_{máx}/DIST_{mín}), lo que repre-

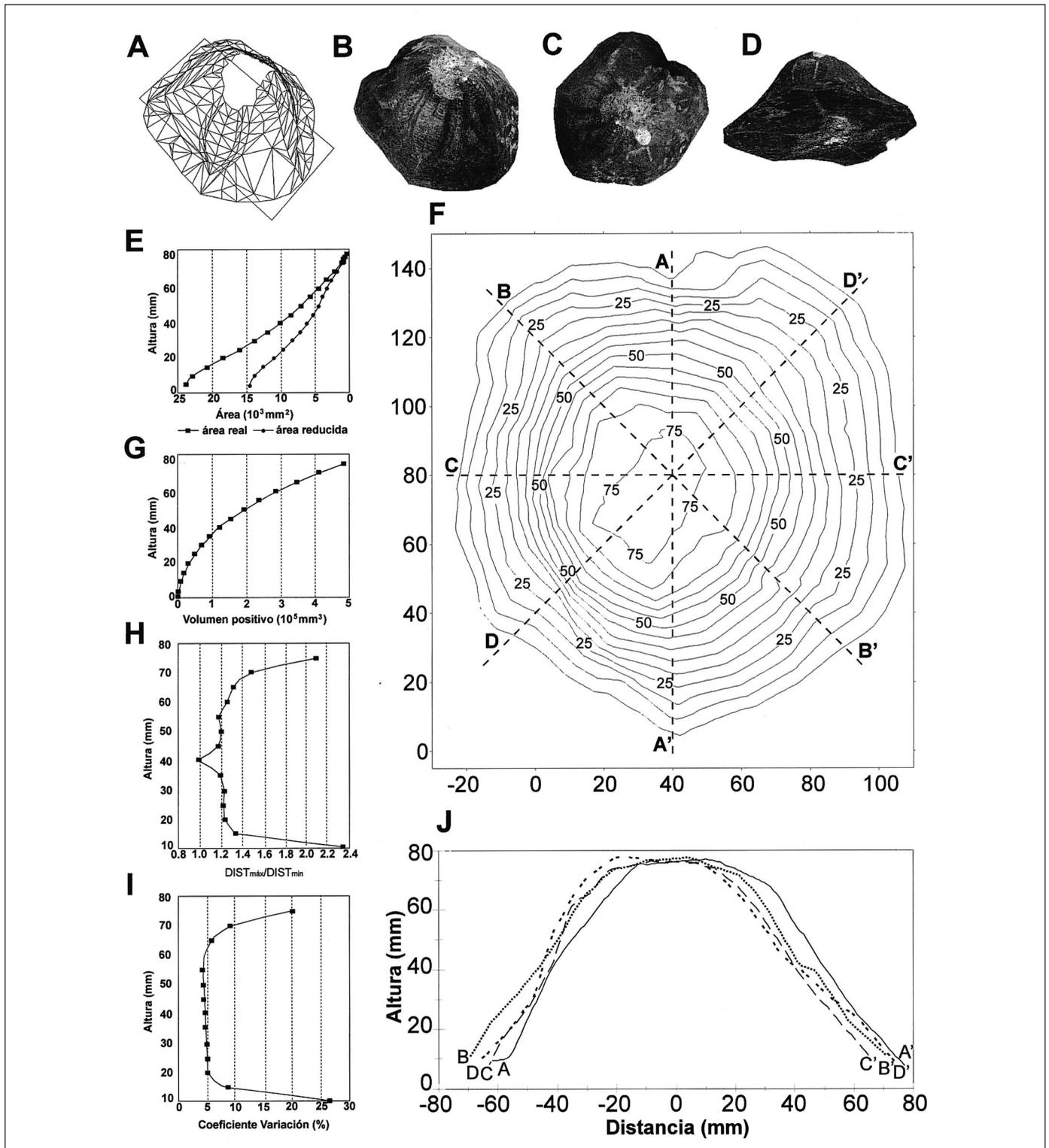


Fig. 5. Modelos digitales 3D en malla de alambre (A) y fotorrealístico (B, C, D) de un equinodermo. Representación con curvas de nivel (equidistancia=5mm) por medio de triangulación (F) y de perfiles (J) de la superficie del equinodermo a partir de los puntos materializados en la malla TIN. Representaciones gráficas de los parámetros dimensionales más representativos: altura vs. área real y reducida (E), altura vs. Volumen positivo (G); altura vs. Distancia máxima/mínima (H) y altura vs. coeficiente de variación expresado en % (I)
 Fig. 5. Wireframe (A) and photorealistic (B, C, D) 3D models of an echinoderm. Echinoderm surface, computed from TIN, represented by contour levels (interval of 5 mm, F) and profiles (J). Graphs show main dimensional parameters: height vs. actual and reduced area (E); height vs. maximum/minimum distance (H); and height vs. variation coefficient, in % (I)

sa un índice de equidimensionalidad de las curvas de nivel. En nuestro ejemplo, este coeficiente está mayoritariamente comprendido entre $DIST_{m\acute{a}x}/DIST_{m\acute{i}n}=1.2-1.5$, a excepción de la base donde aumenta fuertemente la asimetría bilateral del ejemplar (ver Figs. 5F, 5J) y la parte superior donde el deterioro tafonómico del ejemplar distorsiona el cálculo (ver Figs. 5A, modelo en malla de alambre, y 5B, 5C y 5D, modelos fotorrealísticos). Hacia 40mm de la base el parámetro $DIST_{m\acute{a}x}/DIST_{m\acute{i}n}$ alcanza los valores máximos (próximos a $DIST_{m\acute{a}x}/DIST_{m\acute{i}n}=1$) aproximándose a una forma equidimensional-circular para esta curva de nivel. Alternativamente se puede efectuar el cálculo del coeficiente de variación (σ/x) de las distancias de cada punto planimétrico de la curva de nivel respecto al centroide (Fig. 5I), que ofrece unos resultados comparables con el parámetro $DIST_{m\acute{a}x}/DIST_{m\acute{i}n}$.

Consideraciones finales

La precisión métrica teórica de la metodología propuesta de generación de modelos 3D puede alcanzar en condiciones ideales 0.03 % de las dimensiones medidas. Para ello se requiere una cámara métrica o semimétrica calibrada (los sistemas fotogramétricos comerciales habitualmente permiten una calibración parcial), un escáner de alta resolución (alternativamente cámara digital), un control apropiado del objeto (número suficiente de puntos de apoyo y/o dimensiones en el objeto y su entorno conocidas con precisión) y unas fotografías adecuadas en cuanto a su número, ángulos de convergencia y perspectiva. Para generar el modelo digital 3D se requiere un software específico fotogramétrico y diverso software y hardware de uso común en los laboratorios de tratamiento de imágenes. Esta precisión métrica, además de ser sensiblemente mejor que la alcanzable con métodos convencionales de medida de fósiles, es suficiente para aquellas labores en Paleontología donde las mediciones detalladas son fundamentales.

El tiempo de ejecución del proceso de generación de un modelo 3D de un fósil con máxima precisión oscila entre 3 y 15 horas, de acuerdo con el tamaño y complejidad del resto, número de fotografías necesarias, uso de cámara digital/convencional, puesta a punto del sistema informático y destreza del operador. Las posibilidades que ofrece para el análisis dimensional cuantitativo el modelo digital 3D junto con las ventajas antes señaladas del formato digital, pueden en muchos casos rentabilizar el tiempo de ejecución del proceso.

El valor del instrumental necesario para la modelización 3D y los tiempos de ejecución del proceso pue-

den ser notablemente rebajados con el empleo de hardware de bajo coste y un menor número de puntos que definen el modelo 3D. Esta estrategia es apropiada en aquellos casos donde la caracterización métrica de precisión no es necesaria, sino la representación fotorrealística del fósil. En estos casos los rangos de precisión de los modelos 3D oscilan entre el 0.5 y 2% de las dimensiones del fósil.

Los parámetros y relaciones paramétricas obtenidas a partir de la nube de puntos (coordenadas XYZ) que definen la malla TIN medida sobre el fósil permite cuantificar de un modo preciso su morfología. Estos parámetros que serán distintos en cada grupo fósil favorecerán la comparación entre restos para aplicaciones taxonómicas y filogenéticas.

Agradecimientos

El presente estudio se ha realizado con la cobertura económica de los grupos de investigación EMMI (RNM-178), Ingeniería Cartográfica (TEP-164) y Recursos Hídricos (RNM-126) de la Junta de Andalucía, así como de los proyectos HID98-0983 (DGICYT) y PB97-0803 (DGICYT).

Referencias

- Arsuaga, J. L., 1999. Restitución Tridimensional de Imágenes Tomográficas de Fósiles. En: Rábano, I. (ed.), *XV Jornadas de Paleontología*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, vol. II, 459.
- Atkinson, K. B. (Ed.), 1996. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, UK, 371 pp.
- Bookstein, F., Chernoff, B., Elder, R., Humphries, J., Smith, G. & Strauss, R., 1985. *Morphometrics and Evolutionary Biology*. The Academy of Natural Sciences of Philadelphia. Philadelphia.
- Caracuel, J. E., Cardenal, F. J. y Delgado, J., 1999. Aplicaciones Fotogramétricas Digitales al análisis Morfométrico de Restos Fósiles. XV Jornadas de Paleontología. Madrid. En: Rábano, I. (ed.), *XV Jornadas de Paleontología*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, vol. II, 460-461.
- Caracuel, J. E., Cardenal, J., Delgado, J. y Boix, M., 2001. Modelización digital de macroinvertebrados fósiles con escáner 3D. *XVII Jornadas de la Soc. Esp. de Paleontología: los fósiles y la paleogeografía*. Publicaciones del Seminario de Paleontología de Zaragoza. Vol 5.2, 637-642.
- Cardenal, J., Delgado, J., Caracuel, J. E. y Ordoño, L., 2001. Sistemas fotogramétricos automatizados para la obtención de medidas y visualización de grandes restos fósiles. *XVII Jornadas de la Soc. Esp. de Paleontología: los fósiles y la paleogeografía*. Publicaciones del Seminario de Paleontología de Zaragoza. Vol 5.2, 643-648.

- Computational Paleontology, Norway, 25/04/01.
<http://www.notam.uio.no/~oyvindha/compal.html>.
e-mail: oyvindha@notam.uio.no.
- Computer Associates International Inc. Home Page, 15/02/02. <http://www.cosmoplayer.com>.
- Ghosh, S. 1987. *Analytical Photogrammetry*. Pergamon Press, USA, 308 pp.
- I.S.P.R.S. Home Page, USA, 25/04/01.
<http://www.isprs.org/isprs.html>.
e-mail: fabio@geod.baug.ethz.ch.
- Karara, H. M. (Ed.), 1989. *Non topographic photogrammetry*. 2nd Ed. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Fall Church VA USA. 445 pp.
- Kitchell, J. A., 1990. Chapter 6.1. Computer Analysis in Palaeontology. En Briggs & Crowther (ed.), *Palaeobiology A Synthesis*. Blackwell Sc. Pub. UK, 493-499.
- Meinhardt, H., 1995. *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*. Springer-Verlag. Berlin, (Alemania).
- Merrit, L., 1997. *3D Modeling from Photos*. Ed. 3DC Press, USA, 363 pp.
- Optimas Home Page, USA, 25/04/01.
<http://www.optimas.com/appnotes/an013.htm>.
e-mail: info@mediacy.com.
- Photomodeler Home Page, USA, 25/04/01.
<http://www.photomodeler.com>.
e-mail: sales@photomodeler.com.
- Raup, D. M., 1966. Geometric Analysis of Shell Coiling: General Problems. *Journal of Paleontology*, vol. 40, 1178-1190.
- Riedel, WM. R., 1989. Identify: A Prolog Program to Help Identify Fossils. *Computers & Geosciences*, vol. 15, 5, 809-823.
- ShapeQuest Inc. Home Page, USA, 25/04/01.
<http://www.shapequest.com>.
e-mail: gary@shapequest.com.
- The Digital Biology Project Home Page, USA, 25/04/01.
<http://www.biota.org/index.html>.
e-mail: biota@acon.org.
- The Natural History Museum Home Page, G.B., 25/04/01.
<http://www.nhm.ac.uk/museum/tempexhib/vrml/index.html>.
- Willianson, J. R. & Brill, M. H., 1990. *Dimensional Analysis Through Perspective*. Kendall/Hunt Pub. Com. & American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 181 pp.
- Wolf, P. R., 1983. *Elements of Photogrammetry*. MacGraw Hill Pub. 628 pp.

Recibido: Mayo 2001

Aceptado: Febrero 2002