

Modelado en tres dimensiones de recipientes arqueológicos a partir de sus perfiles



La arqueología y la restauración requieren el registro, la reconstrucción y la clasificación de las piezas, tareas que se hacen manualmente. El modelado de recipientes como vasijas, platos, ollas y comales encontrados en los sitios arqueológicos implica muchas horas de trabajo, por lo que proponemos una metodología para el registro y modelado de recipientes arqueológicos a partir de software no especializado y una comparación con técnicas más sofisticadas, utilizando un escáner láser. Los programas vectoriales como *AutoCAD* y *3D Studio Max* son herramientas poderosas para crear imágenes tridimensionales a partir de los perfiles, convirtiéndolos en sólidos de revolución y permitiendo de esta manera calcular áreas, volúmenes y masas, además de que el usuario las puede rotar y escalar, así como observarlas bajo diferentes condiciones de luz y cambiar el color y la textura hasta obtener una representación muy aproximada a la pieza real.

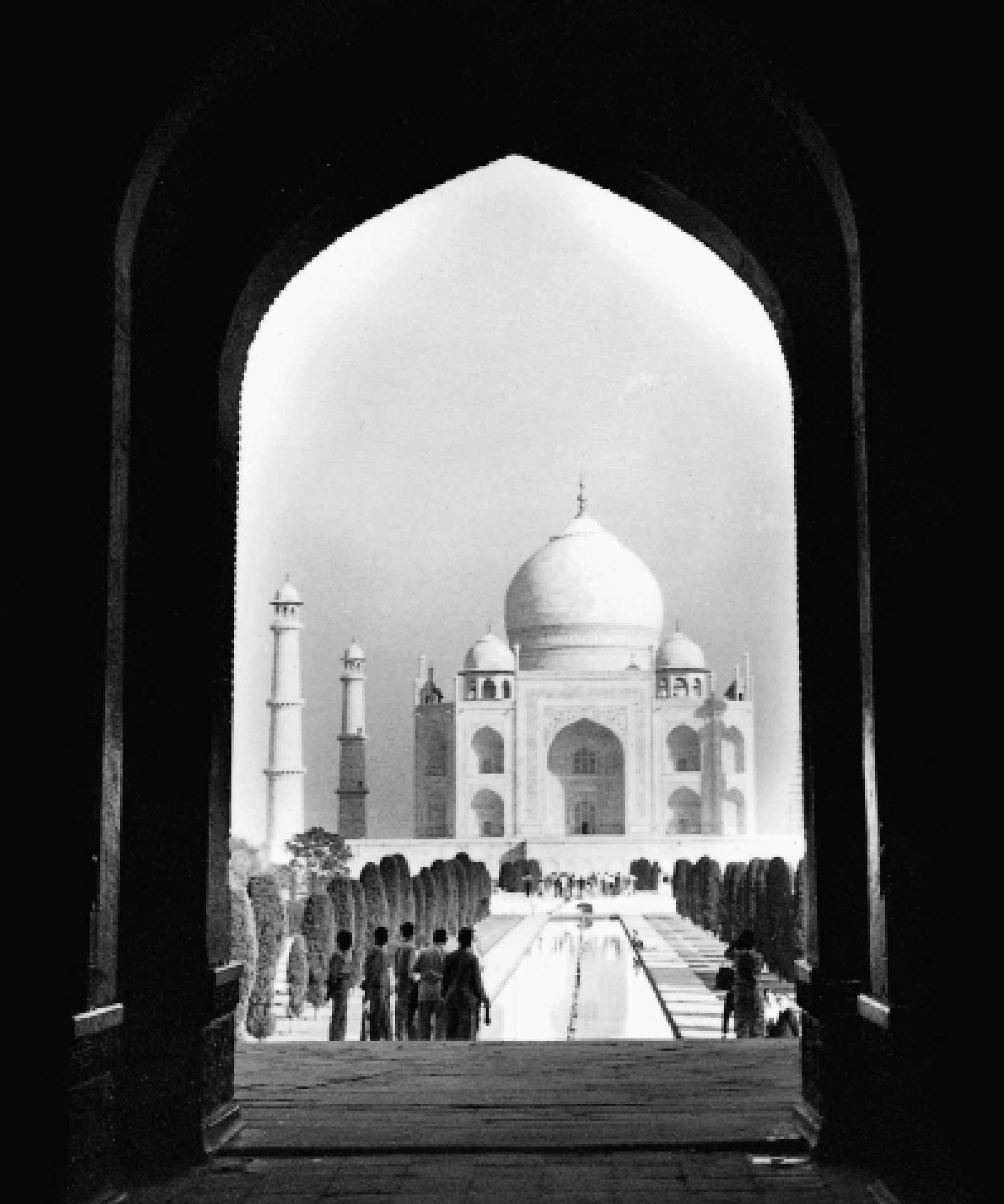
No obstante, pese a ofrecer representaciones muy realistas, el equipo necesario para realizar un modelado de piezas usando técnicas de escaneo tridimensional suele ser

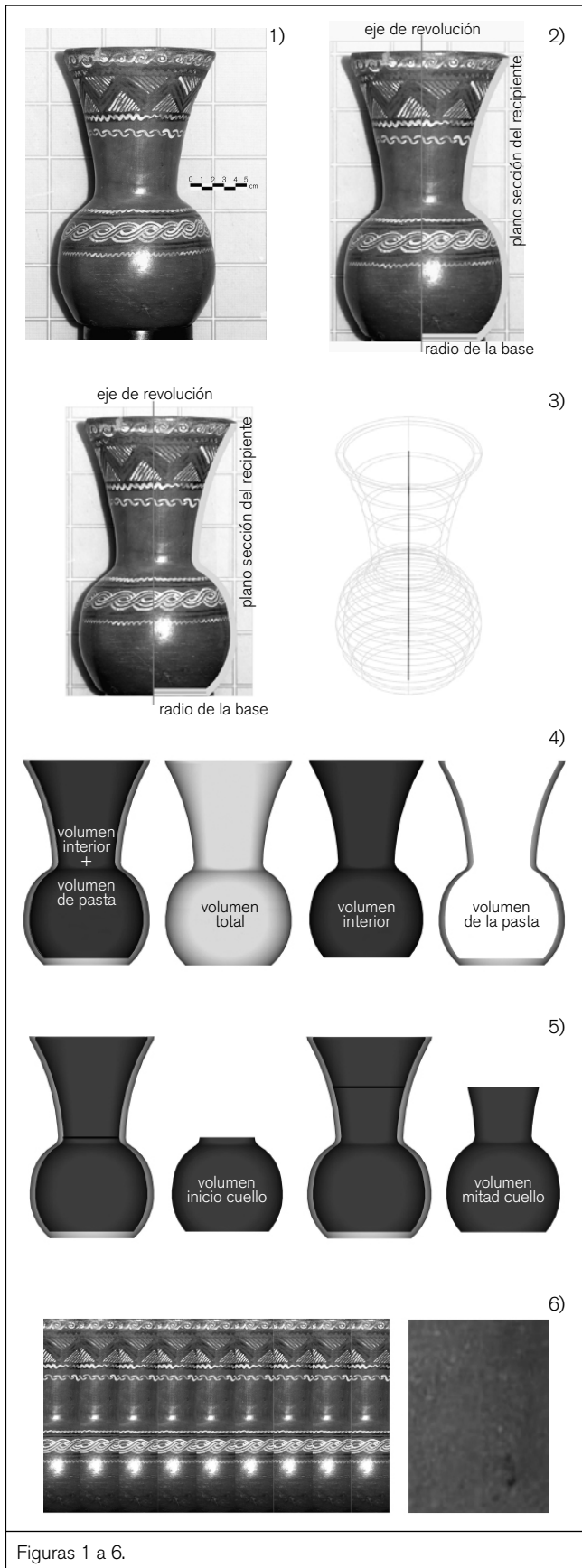
costoso, ya que se requieren computadoras robustas, fuentes de luz especiales y un escáner láser. Una alternativa más barata y que ofrece resultados satisfactorios es la reconstrucción de un objeto en tres dimensiones a partir de imágenes bidimensionales, una técnica que se conoce como “modelado a partir de la imagen”.

Esta reconstrucción virtual es un trabajo interdisciplinario, ya que involucra a diseñadores gráficos, ingenieros, arqueólogos y restauradores para que se logre modelar la pieza con base en la información arqueológica existente, de manera que el resultado esté ligado al contexto en el que se encontró la pieza.

Generalmente son siete las fases principales para el modelado en tres dimensiones a partir de imágenes bidimensionales: 1) medición y fotografías de las piezas; 2) dibujo y reconstrucción del perfil; 3) creación del sólido de revolución; 4) obtención de volúmenes y área; 5) reconstrucción de la textura; 6) superposición de la textura sobre el recipiente modelado (el llamado “renderizado”); y 7) la animación de los modelos.

Jorge Blancas, Luis Barba, Agustín Ortiz y Felipe Barba





Figuras 1 a 6.

Medición y fotografía

Se debe reunir toda la información disponible de las piezas, así como seleccionar las que estén en mejor estado para tener una reconstrucción confiable. Para tal estudio se utilizó una pieza moderna y completa, con apariencia antigua, de la que pudimos medir con toda precisión sus dimensiones: altura, diámetro superior, diámetro inferior, espesor en tres puntos del recipiente, peso y volumen bruto que podía contener. Como primer paso, la pieza se monta en una base horizontal con una escala en el fondo y una iluminación apropiada, posteriormente se fotografía en alta resolución, utilizando una cámara digital y un trípode. La cámara también se niveló para lograr que la fotografía fuera perpendicular al jarrón y reducir al mínimo la deformación óptica (figura 1).

Dibujo y reconstrucción del perfil

Utilizando el software *AutoCAD* se importa la fotografía del jarrón en el entorno del programa y se redimensiona la imagen, apoyándose en la escala gráfica de la fotografía. Posteriormente, dibujamos el borde exterior utilizando segmentos de arcos que se aproximan a la forma del recipiente. Para trazar el borde interior, se copia el exterior y se ajusta con la información del espesor del recipiente (figura 2). Si el recipiente está incompleto se consideran las proporciones entre altura y anchura a partir del contexto arqueológico.

Creación de la figura en tres dimensiones

Una vez que se ha hecho el dibujo del perfil sobre la fotografía, dibujamos una línea perpendicular al radio de la base de nuestra pieza que será el eje de revolución a partir del cual se creará el objeto en tres dimensiones, lo que se denomina un "sólido de revolución", y para el cual hay que definir dos aspectos importantes: el plano de la sección que resulta al unir el perfil del borde exterior e interior, y el eje de rotación o revolución (figura 3a). Esto permite que, a partir de la sección del recipiente y el radio de la base, se aplique la operación de revolución, independientemente de que el recipiente esté completo (figura 3b).

Cálculo de volúmenes y área

El proceso para calcular volúmenes y el área del material en *AutoCAD* es automático; sin embargo, para el caso del vo-



lumen tenemos que definir tres características importantes: a) el volumen de la pasta, que se calcula de forma sencilla con el programa *AutocAD*; los parámetros necesarios son el plano de la sección del recipiente y el eje de revolución, que está a una distancia igual al radio de la base. El cálculo se puede hacer de dos formas, la más simple es darle un comando al programa para que calcule las propiedades físicas de nuestro modelo, el programa arroja datos diversos entre los cuales se encuentra el volumen de la pasta. Otra forma alternativa, pero que puede servir para comprobar el cálculo y obtener información adicional, como el volumen bruto, es crear un sólido de revolución con el borde exterior del recipiente, después crear otro sólido con el borde interior, calcular sus volúmenes y restarlos para obtener el volumen de la pasta (figura 4); b) el volumen bruto o volumen máximo del recipiente, esto es, la capacidad máxima del recipiente, que se obtiene utilizando el borde interior del recipiente y el eje de revolución, generando un sólido de revolución interior a partir del cual calculamos el volumen bruto —equivalente al volumen interior de la figura 4; c) el volumen neto o volumen de llenado que, en sentido práctico, se determina por la cantidad máxima a la cual era llenado el recipiente en su uso cotidiano. Este dato es difícil de establecer debido a que depende de los posibles usos y de la aplicación ligada a un contexto —en este ejemplo establecemos dos volúmenes, uno en el inicio del cuello y otro a la mitad del cuello (figura 5); y d) el cálculo del área, cuyo proceso de obtención es automático en *AutocAD* —basta un comando y la selección del objeto. Este dato puede ser útil en la restauración para conocer el área

que cubre el pigmento y el decorado en la cara exterior e interior del recipiente.

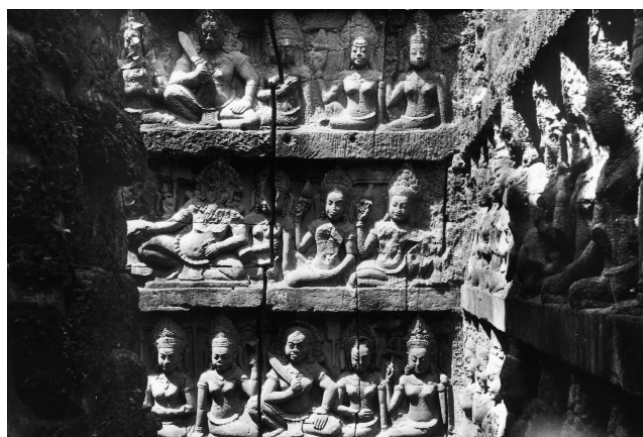
Reconstrucción de la textura

En esta fase se emplean las fotografías tomadas a la pieza. Si el recipiente contiene elementos decorativos que cambien sustancialmente alrededor, deberá fotografiarse cada elemento. En caso contrario, si el recipiente presenta un decorado uniforme, con cuatro fotografías tomadas cada noventa grados alrededor de la pieza será suficiente. Para la edición de las fotografías puede emplearse cualquier programa de edición de imágenes, como el *Adobe Photoshop*. En este paso igualamos el color del decorado, quitamos los reflejos y ajustamos brillo y contraste. Posteriormente empalmamos las fotografías una tras otra hasta tener un fotomosaico. La textura interior generalmente es uniforme, por lo que con un par de fotografías es suficiente para reconstruirla (figura 6). Adicionalmente se emplean filtros de suavizado y enfoque para que el resultado se aproxime más a la textura real. Finalmente, ajustamos la escala de la imagen a las dimensiones reales de la pieza (figura 7).

Superposición de la textura

El mapeado o superposición de la textura es el método por medio del cual se le añade una imagen a una malla o estructura alámbrica para que la imagen se adapte a la forma del recipiente y proporcione realismo con el renderizado —proceso por el cual la computadora “interpreta” una escena en tres di-





mensiones y la plasma en una imagen bidimensional. El tiempo de renderización depende en gran medida de los parámetros establecidos en las texturas, las luces y sombras, así como de la configuración y el tipo de renderizado.

Desde el *AutoCAD* podemos agregar una textura preliminar a nuestro modelo en forma de malla, sin embargo, aunque el modelo tiene una buena representación, aún no corresponde a la textura real.

En *3d Studio Max* se importa el sólido de revolución desde *AutoCAD* como estructura alámbrica. La resolución de la pieza depende del número de polígonos que la forman —si empleamos una figura con pocos polígonos, los bordes redondeados estarán formados por segmentos de rectas que darán una representación de baja resolución. En caso contrario, si utilizamos un sólido con gran cantidad de polígonos, las superficies curvas estarán muy definidas aunque el tiempo de procesamiento se incrementará (figura 8).

La imagen importada solamente contiene la información de la geometría y las dimensiones de la pieza. En el entorno del programa se observan cuatro vistas para manipularla: superior, anterior, izquierda y en perspectiva, donde podemos escalarla, girarla y moverla de acuerdo con nuestras necesidades. El proceso para agregarle la textura es más minucioso. Hay que señalar que la malla de 3D importada no tiene ninguna textura asignada y es necesario montarla para que adquiriera un aspecto más realista. Recordemos que el recipiente contiene dos texturas, la interior y la exterior, por lo que si aplicamos la textura sin hacer los ajustes necesarios se fijará a toda la pieza —razón por la cual el proceso de asignación de texturas no es directo. Es necesario convertir la malla original en una malla editable (figura 9), es decir, dividirla en polígonos exteriores e interiores susceptibles a ser modificados. El proceso es manual y consiste en selec-

cionar cada polígono del interior y del exterior, asignándole la textura adecuada (figura 10).

Una vez asignadas correctamente las texturas en la parte interior y exterior, el programa *3d Studio* ofrece una gran cantidad de efectos para darle a las piezas de cerámica un aspecto fotorrealista. Esto es una parte muy importante, ya que de ella depende en gran medida la credibilidad o no de una escena. Los materiales son el medio que tenemos en las aplicaciones de modelado tridimensional para definir, para cada material, parámetros de distintos elementos como color, textura, brillo u opacidad, de manera que la superficie de las pastas, la piedra, la madera, el plástico o el metal que estemos representando luzca realmente como tal.

Es importante puntualizar que un material es un compendio de propiedades que definen la textura de un objeto. Los mapas, por otro lado, son imágenes convencionales que forman parte de los parámetros modificables de nuestro material y nos permiten representar determinados efectos sobre la superficie del objeto en cuestión. Por consiguiente, los mapas, que pueden ser imágenes en formato bmp, jpg o tif, entre otros, están subordinados a un material y no en forma inversa. Si bien *3d Studio Max* maneja más de una decena de canales de imágenes distintos por cada material, nosotros nos concentraremos, particularmente, en sólo dos de ellos, suficientes para darle realismo a una pieza sencilla: el color difuso y el relieve.

El primero es el color de la textura y la base de todo el objeto, que forma parte de una escena dentro de *3d Studio*. Ahora bien, si modelamos el jarrón, no es suficiente con darle un color al material, es necesario cubrir la superficie del objeto con un *bit-map* que represente la superficie de nuestra pieza. Precisamente para eso existe este canal, y aquí podremos especificar la imagen que recubrirá todo o parte de nuestro objeto.



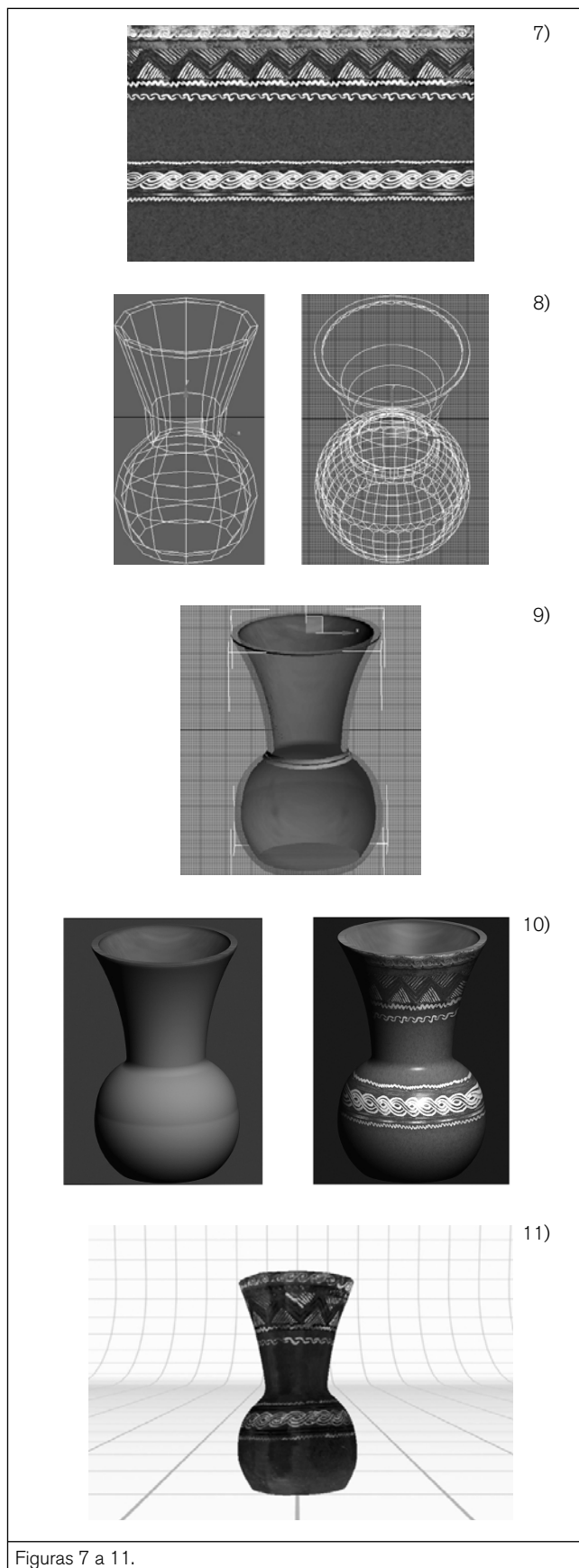
Por otro lado, sabemos que toda superficie, por más lisa que sea, tiene siempre cierto relieve al cual nuestro tacto es sensible. Para ello existe el canal relieve. Con él podremos especificar un *bitmap* que represente el nivel de porosidad o relieve de la superficie, y asignar a las zonas más oscuras de la imagen una profundidad mayor que a las claras. De esta manera, es posible, sin demasiado trabajo, realizar efectos de veteado, rajado, rayado, cuarteado, escamado, etcétera. Para tener una mejor idea, el poder del canal relieve y de todas sus configuraciones es tal, que nos permite representar muchísimos cuerpos irregulares simplemente con una textura de relleno (color difuso) y otra de texturizado (relieve), y sin necesidad de modificar la malla del objeto ni de complicarnos agregando elementos adicionales.

Existen otros canales que se pueden aplicar a las piezas para darles realismo y, según el tipo de material, se puede llegar a un nivel en el que sea difícil distinguir entre la fotografía de la pieza real y del modelo obtenido a partir de únicamente su perfil. Sin embargo, no es nuestro objetivo abordar todas las funciones del programa, sino simplemente mostrar las posibilidades que hoy día tiene este tipo de herramientas para restaurar virtualmente un recipiente.

La animación de los modelos

Otra posibilidad que ofrecen estos programas es la de animar los recipientes para crear escenas virtuales, la cual se basa en el principio de la visión humana — cuando vemos cambiar rápidamente una serie de imágenes fijas relacionadas, nuestro cerebro las percibe como un movimiento continuo. Cada una de estas imágenes individuales se denomina “fotograma”. En la mayor parte de los fotogramas de una animación se efectúan cambios progresivos rutinarios partiendo del fotograma anterior, los cuales pueden ser en escala, posición y rotación en relación con el tiempo. Tradicionalmente, el problema principal de la creación de animaciones ha sido el esfuerzo necesario para generar grandes cantidades de fotogramas. Según la calidad de la animación, un minuto puede necesitar entre 720 y 1800 imágenes renderizadas distintas. La creación de imágenes a mano es un trabajo muy laborioso y es aquí donde utilizamos este tipo de herramientas para observar nuestros modelos en distintas vistas e incluso colocarlas en diferentes ambientes virtuales.

Adicionalmente, comparamos esta metodología con técnicas de escaneo láser para poder comparar una técnica de registro casi manual con una automática. El equipo emplea-



Figuras 7 a 11.



do fue un *Desktop 3D Scanner Next Engine*, el cual consiste en un sistema óptico de medición basado en la transmisión de luz láser, en el que la superficie de un objeto es iluminada por este tipo de luz punto por punto y el sistema mide la reflectancia, que es la capacidad de una superficie para reflejar energía electromagnética en una determinada longitud de onda. El escaneo láser provee una alta densidad de puntos adquiridos en la superficie de un objeto, un proceso que permite el registro detallado de la superficie de objetos y la reconstrucción tridimensional “lo más exacta posible” —no sólo planimétrica, sino también volumétrica—, y que se registre, con una “precisión milimétrica”, las formas y el proceso de deterioro que ha sufrido la pieza hasta la actualidad.

La técnica de escaneo láser tiene algunas ventajas sobre el método propuesto; la principal es que nos ofrece una representación “exacta” de la superficie, el decorado, y la forma del objeto en tres dimensiones. No obstante, uno de los problemas que tiene es que, en superficies muy brillantes, la luz láser se dispersa y es necesario aplicar un espray a la superficie para minimizar tal efecto, un fenómeno que también se presenta en superficies muy ásperas, donde es necesario adquirir una mayor densidad de puntos para representar la superficie adecuadamente. La figura 11 muestra la imagen del jarrón obtenida por medio del escaneo de una de sus caras —las diferencias de color que puede haber en la superficie se deben a la aplicación del espray para quitar el brillo.

SÓLIDOS DE REVOLUCIÓN

El principio matemático de esta metodología se basa en curvas y superficies planas que giran en torno a un eje fijo formando figuras tridimensionales. En términos generales, se denomina superficie de revolución a toda figura geométrica que se forma al hacer girar una curva plana alrededor de otra fija, llamada eje de rotación. Conos, cilindros y, en sentido amplio, esferas son grandes categorías genéricas de figuras creadas por la rotación de elementos geométricos en torno a un eje fijo. Por otra parte, si una región plana se gira alrededor de un eje (x o y) en ese mismo plano, se obtiene una figura tridimensional llamada sólido de revolución generado por la región plana alrededor de lo que se conoce como eje de revolución. La representación gráfica de un sólido de revolución es generalmente la misma de la figura plana que lo generó. Este tipo de sólidos se utilizan frecuentemente en ingeniería y en procesos de producción de ejes, embudos, pilares, botellas y émbolos.

El volumen del sólido de revolución que se genera al hacer girar alrededor del eje y la región que está comprendida entre la curva $x = f(y)$, con $f(y) > 0$, el eje y y las rectas horizontales $y = a$ y $y = b$, donde $0 < a < b$, está dado por la integral:

$$V = 2\pi \int_a^b y f(y) dy$$

El área de la superficie generada al hacer girar una curva $x = f(y)$ alrededor del eje y es:

$$A = 2\pi \int_a^b y \sqrt{\left(\frac{dx}{dy}\right)^2 + 1} dy$$

El cálculo del área, volumen, masa y densidad de las piezas cerámicas es realizado por el software utilizando estas fórmulas con algoritmos de aproximación numérica.

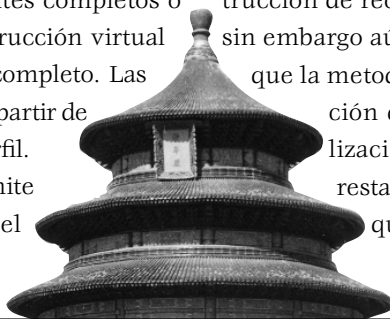
Consideraciones finales

La metodología propuesta para modelar recipientes arqueológicos a partir de sus perfiles ofrece una alternativa de bajo costo, pues el modelado en tres dimensiones a partir de una imagen bidimensional proporciona una buena aproximación a la pieza. No obstante, el método es sólo aplicable a recipientes que se puedan modelar como sólidos de revolución, y se puede hacer con recipientes completos o desde sus fragmentos, ya que la reconstrucción virtual del recipiente es posible aun si no está completo. Las piezas faltantes pueden ser modeladas a partir de la simetría y los radios de curvatura del perfil.

El cálculo del volumen y el área permite obtener datos adicionales para conocer el

uso que se le daba a los recipientes y, por medio de la reconstrucción virtual de un recipiente, es posible conocer aproximadamente la forma y el decorado, por lo que esta metodología ofrece un registro permanente de la pieza reconstruida que puede ser usado en muchas aplicaciones multimedia.

Ciertamente, la técnica de escaneo láser ofrece una representación muy detallada de la superficie y la reconstrucción de recipientes completos en tres dimensiones, sin embargo aún no está al alcance de todos. Es por ello que la metodología aquí propuesta para la reconstrucción de recipientes puede contribuir a la realización del trabajo de los profesionales de la restauración y la conservación de las piezas arqueológicas. 🐼



Jorge Blancas, Luis Barba, Agustín Ortiz y Felipe Barba

Instituto de Investigaciones Antropológicas,
Universidad Nacional Autónoma de México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mara, H. y M. Kampel. 2003. "Automated Extraction of Profiles from 3-D Models of Archaeologicals Fragments", en *Proceedings of the XIXth International Symposium CIPA*. Institute for Automation. Vienna University of Technology, pp. 87-92.

Yilmaz, U., O. Ozun, B. Otlu, A. Mulayim y V. Atalay. 2003. "Inexpensive and Robust 3D Model Acquisition System for There-Dimensional Modelling of Small Artifacts. Department of Computer Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey", en *Proceedings of the XIXth International Symposium CIPA*, pp. 286-290.

Iqbal, M. y Q. Hisham. 2005. "Virtual assembly of pottery fragments using moiré surface profile measurements", en *Journal of Archaeological Science*, núm. 32, pp. 1527-1533.

Cruz Sopena, M. 2006. "La investigación Arqueológica a partir del dibujo informatizado de cerámica", en *Saldvie, Revista Digital*. Universidad de Zaragoza, Estudios de Prehistoria y Arqueología, núm. 6, pp. 13-27.

Simon, A. W., D. Van Alfen, A. Razdan, G. Farin, M. Bae y J. Rowe. 2005. "3D modeling for analysis and archiving of ceramic vessel morphology: A case study from the American Southwest", en *Proceedings of the 33rd International Symposium on Archaeometry, April 22-26, 2002*. H. Kars y E. Burke (eds.), pp. 257-263.

IMÁGENES

Ignacio Chávez, p. 56: templo de Angkor Wat, Camboya; p. 57: Taj Mahal, India; p. 59: cuevas de Ajantá, India; p. 59: Qutab Minar, New Delhi, India; p. 62: Ciudad prohibida, Beijing, China, 1966.

MODELING ARCHEOLOGICAL RECIPIENTS IN THREE DIMENSIONS BASED ON THEIR PROFILES

Palabras clave: modelado, volumen, escaneo laser, reconstrucción 3D.

Key words: Modeling, volume, laser scanning, 3D reconstruction.

Resumen: El presente trabajo ofrece alternativas para el registro, modelado y determinación del volumen de recipientes cerámicos que puede ser de utilidad para la investigación arqueológica y la restauración. Se comparan las ventajas y desventajas del escaneo tridimensional con laser y la reconstrucción en tres dimensiones (3D) de un cuerpo a partir de imágenes bidimensionales.

Abstract: This article offers alternatives for recording, modeling, and determining the volume of ceramic recipients that may be helpful to archeological research and restoration. The advantages and disadvantages of three-dimensional laser scanning and 3D reconstruction of a body from two-dimensional images are compared.

Jorge Estanislao Blancas Vázquez es ingeniero geofísico de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y pasante de maestría del Posgrado en Ciencias de la Tierra. Sus áreas de trabajo son las técnicas geofísicas y los sensores remotos aplicados a la arqueología.

Luis Alberto Barba Pingarrón es ingeniero químico del IPN, maestro en geología arqueológica de la Universidad de Georgia y doctor en antropología por la UNAM. Su línea investigación es la arqueometría con énfasis en la prospección arqueológica y el estudio de residuos químicos en materiales arqueológicos porosos.

Agustín Ortiz Butrón es arqueólogo egresado de la Escuela Nacional de Antropología e Historia, con estudios de doctorado en antropología por la UNAM. Sus principales áreas de trabajo son la prospección arqueológica, los residuos químicos en pisos y los temascales.

Luis Felipe Barba Flores es matemático egresado de la Facultad de Ciencias y Maestro en Ciencias en Ingeniería y Ciencias de la Computación de la UNAM.

Recibido el 9 de febrero de 2011, aceptado el 18 de agosto de 2011.