

## DIGITALIZACIÓN 3D COMO HERRAMIENTA EN LA MANUFACTURA DE CALZADO DEPORTIVO

López Guerrero, Francisco Eugenio

Ramírez Cruz, Francisco

Ávila Cabrera, Adán

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

[elopez@mail.uanl.mx](mailto:elopez@mail.uanl.mx) [ramirez@mail.uanl.mx](mailto:ramirez@mail.uanl.mx)

### RESUMEN

El diseño de productos de consumo debe considerar que la forma sea lo suficientemente atractiva al usuario sin minar las condiciones funcionales. En el caso del calzado deportivo, la complejidad geométrica de la suela es un reto al diseñador que debe dar como resultado un producto con atractivo visual, confort de uso y condiciones de fricción y desgaste.

Este trabajo presenta el método de ingeniería inversa aplicado a la fabricación de una suela de zapato deportivo. El presente incluye solamente la solución al problema geométrico, por medio de la mezcla de diferentes procesos que incluyen la captura, edición y fabricación de modelos geométricos. Se detallan los procedimientos de digitalización geométrica, procesamiento de nube de puntos, creación de fotorealismo e impresión en prototipos rápidos.

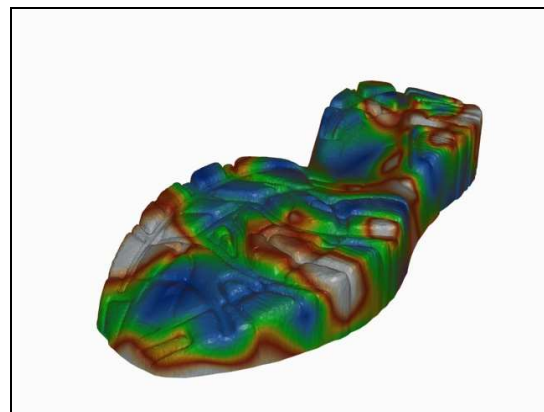
**Palabras clave:** *ingeniería inversa, digitalización 3D, calzado, geometría de suelas, prototipos rápidos.*

### ABSTRACT

In order to be attractive for the end user, the design of consumer products involves not only the functional conditions, but also the esthetic properties. In the case of sport shoes, the geometric complexity of the sole is a challenge for the designer, and the result must be a product with visual attraction, comfort, good friction and wear conditions.

This work presents the reverse engineering methodology applied to the manufacture of a sport shoe sole. It includes only the solution of the geometric problem, through the mix of several technologies: scanning, editing and manufacturing of geometric models. It focuses on the processes: 3D scanning, point cloud processing, virtual reality production and rapid prototyping.

**Keywords:** *reverse engineering, 3D scanning, footwear, geometric shoe shape, rapid prototyping.*



**Fig. 1.** Modelo 3D de la suela del zapato deportivo realizado en este trabajo.

### INTRODUCCIÓN

La digitalización de objetos se ha convertido en una de las herramientas más útiles en el desarrollo de productos debido a la creciente utilización de las técnicas de la ingeniería inversa en la manufactura.

El aspecto fundamental de la implementación de los sistemas de digitalización en el desarrollo de objetos de consumo se encuentra en la posibilidad de reproducir las geometrías de productos ya existentes. Esto es especialmente útil en objetos complejos en términos de sus formas, contornos y perfiles. Tal es el caso del diseño de piezas mecánicas, moldes, objetos ergonómicos o estéticos, gráficos para la industria del entretenimiento y formas aerodinámicas. La creciente implementación de la digitalización en una gran diversidad de industrias ha conducido al desarrollo de diferentes sistemas. Adicionalmente, estudios han demostrado que la captura de geometrías proporciona ventajas en campos de aplicación tales como paleontología [1], antropología [2], biología [3], arte escultórica [4] y sitios históricos [5].

El campo científico dedicado a partes del cuerpo humano es bastante extenso. Los estudios de investigación incluyen no solamente el problema geométrico, sino también la biomecánica, la expresión, el comportamiento y el reconocimiento [6, 7, 8].

### OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue reproducir la suela de un calzado deportivo por medio de diferentes metodologías para capturar, editar e imprimir en prototipos rápidos. Esta tecnología tiene la ventaja de ser un proceso rápido y con buen nivel de precisión. Adicionalmente presenta la ventaja de que una vez capturada la geometría, es posible fabricar réplicas de diferentes tamaños y materiales.

Los objetivos particulares fueron:

- Detallar todas las fases de procesamiento.
- Convertir la información geométrica en formato para imprimir en prototipos rápidos.
- Utilizar las geometrías en aplicaciones de fotorealismo y realidad virtual.

Este trabajo se centra en la reconstrucción geométrica. No considera las variables de ergonomía, confort o funcionalidad en el uso deportivo del calzado.

### METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se siguió un método que consta de los cuatro procesos que se muestran en la figura 2.

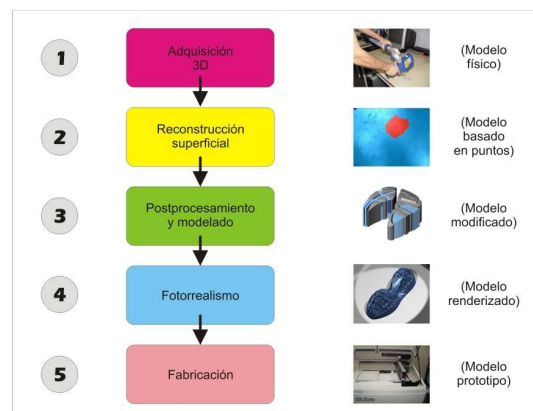


Fig. 2. Esquema de etapas para ingeniería inversa.

A continuación se detallan brevemente cada uno de las etapas.

#### 1) ADQUISICIÓN 3D

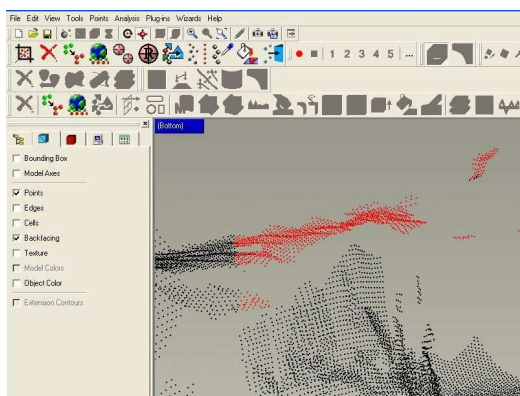
Se captura la geometría de la suela (figura 3), con un digitalizador 3D que funciona por medio de triangulación láser. Para los diferentes colores de la suela fue necesario calibrar los parámetros ópticos del digitalizador.



Fig. 3. Digitalización de la suela del zapato.

Una vez obtenida la nube de puntos, ésta se procesa [9, 10] por medio de computadora para corregir y editar. La figura 4 muestra el proceso de edición de la nube de puntos, mientras que la figura 5 un detalle en donde se borran puntos medidos que no forman parte del objeto. Las nubes de puntos resultado de las pasadas del digitalizador sobre el objeto contienen puntos de traslape (alineados o no, dependiendo del modo de operación); dichas nubes se funden en una sola por medio de la operación de fusión (“merge” en

inglés). Cada pasada del digitalizador debe ser decidida en función de la posición, tamaño y curvatura de la región del objeto a digitalizar. El resultado es una nube de puntos sin redundancias y “limpia” de mediciones indeseadas o fuera de la geometría de interés. Para la geometría del calzado deportivo se obtuvieron 292,785 puntos.



**Fig. 4** Edición básica de la nube de puntos. Borrado de muestreo indeseado.

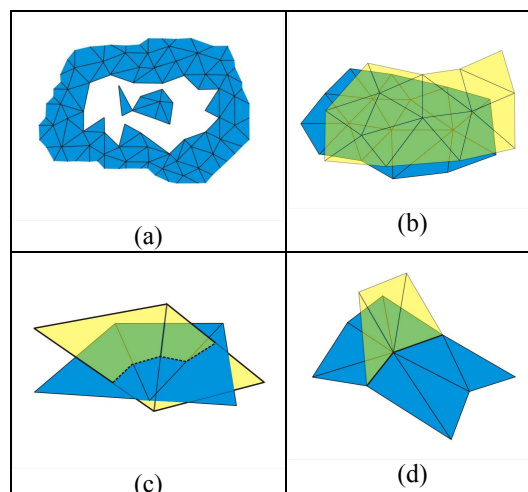


**Fig. 5** Nube de puntos simplificada con densidad baja (40%) para aumentar la visibilidad. En la figura se muestran 117,114 puntos.

A menudo sucede que las geometrías deban digitalizarse en diferentes sesiones de captura. Como consecuencia de ello (y aún también con procesos automáticos de captura, pero en proporción menor) existen defectos –o situaciones naturales del proceso- en las mallas resultantes de la interpolación de los puntos capturados. Algunos de los más importantes son:

- agujeros e islas,
- traslapes,
- intersecciones,
- orillas complejas,
- vértices singulares,
- dobleces,
- grietas,
- orientaciones inconsistentes.

Los más significativos se muestran en la figura 6.



**Fig. 6.** Defectos de digitalización debido a la manipulación del scanner. (a) agujeros con islas, (b) traslapes, (c) intersecciones y (d) orillas complejas.

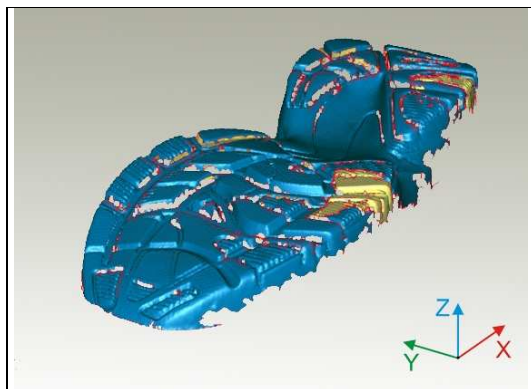
## 2) RECONSTRUCCIÓN SUPERFICIAL

La forma más simple de representar mallas es por medio de triángulos individuales. Algunos formatos de intercambio de datos usan esta representación como un común denominador (por ejemplo el formato STL). Sin embargo, esta forma no es suficiente: la información de interconectividad no se puede acceder explícitamente [11].

Dependiendo de la aplicación en donde será utilizada la geometría, es necesario adicionar elementos o agregar operaciones de conversión. El formato utilizado en este trabajo fue VRML; las razones se explicarán en la sección de impresión del prototipo rápido.

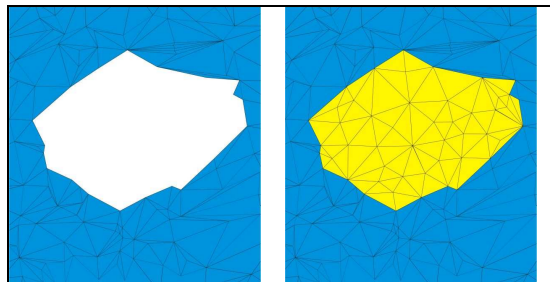
### *Reparación del modelo*

Es remover todos los defectos de un modelo geométrico para producir un modelo adecuado para su procesamiento posterior en otras aplicaciones que tienen el requisito de calidad en los datos de entrada. Los algoritmos de reparación pueden clasificarse en orientados a superficie (rellenar agujeros, reparar orillas, delinear islas) y orientados a volumen (registro global y local). Vea las figuras 7 y 8.



**Fig. 7.** Malla de triángulos resultado de la digitalización. Obsérvese que contiene agujeros e imperfecciones.

Suavizar la malla es la herramienta central en el procesamiento geométrico que incluye el quitar el ruido (típico de las mediciones hechas con un digitalizador) y las perturbaciones (por ejemplo las posiciones de los vértices que no corresponden a la forma de la geometría original).



**Fig. 8.** Triangulación de un agujero que minimiza la variación normal y el área total. Note la diferente forma de triangulación del algoritmo.

Registrar rangos digitalizados (**Registered Range Scans**).- Son conjuntos de mallas triangulares que representan secciones de traslapamiento de una superficie de un objeto. Estas secciones deben fundirse en una sola malla. El principal problema geométrico es que cada sección mantiene su información propia de interconectividad y ésta no necesariamente es compatible con la de las demás secciones [12]. En la figura 9 se muestra el resultado del acoplamiento de las superficies registradas.



**Fig. 9.** Superficie reparada. Las regiones de traslape se registraron y se fusionaron en una sola superficie.

## 3) POSTPROCESAMIENTO Y MODELADO

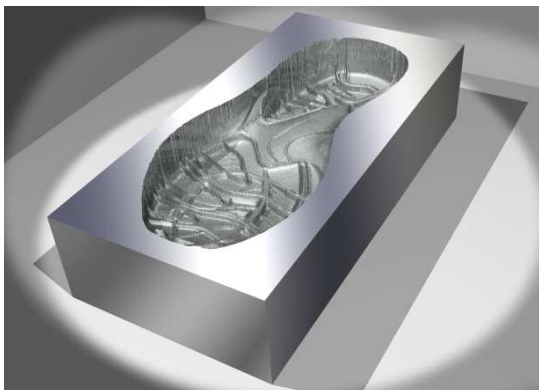
Usualmente, los polígonos de la malla necesitan algunos refinamientos para corregir otras imperfecciones de la superficie. Estas operaciones las ejecuta el usuario por medio de algoritmos interconstruidos en programas de manejo de mallas a partir de nubes de puntos. Algunas operaciones básicas disponibles para el postprocesamiento de la superficie son:

- Manejo de polígonos: Remover picos, reducir ruido, decimar, relajar, refinar, aplanar, deformar regiones.



- Edición de referencias de primitivas geométricas (DATUM): Creación de planos de referencia, ajuste a agujeros, curvaturas de orillas y creación de filos.
- Extracción de curvas y sub-superficies: Crear, modificar y extraer curvas (normalmente splines) que siguen alguna trayectoria sobre la superficie. Separación de parches (patches) para el manejo independiente de secciones de superficie.
- Funciones de análisis: Incluye medir distancias, calcular volumen, revisar intersecciones, comparar la geometría con modelo de CAD para encontrar desviaciones, extraer secciones transversales.

En la fase de modelado se introdujo el resultado de la digitalización a un sistema de CAD para elaborar un molde. El molde se llevó a cabo creando un volumen paralelepípedo recto y restando volumétricamente la geometría de la suela. (Ver figura 10).



**Fig. 10.** Estudio preliminar de la geometría inversa para la fabricación del molde.

#### 4) CREACIÓN DE LA ESCENA DE FOTOREALISMO

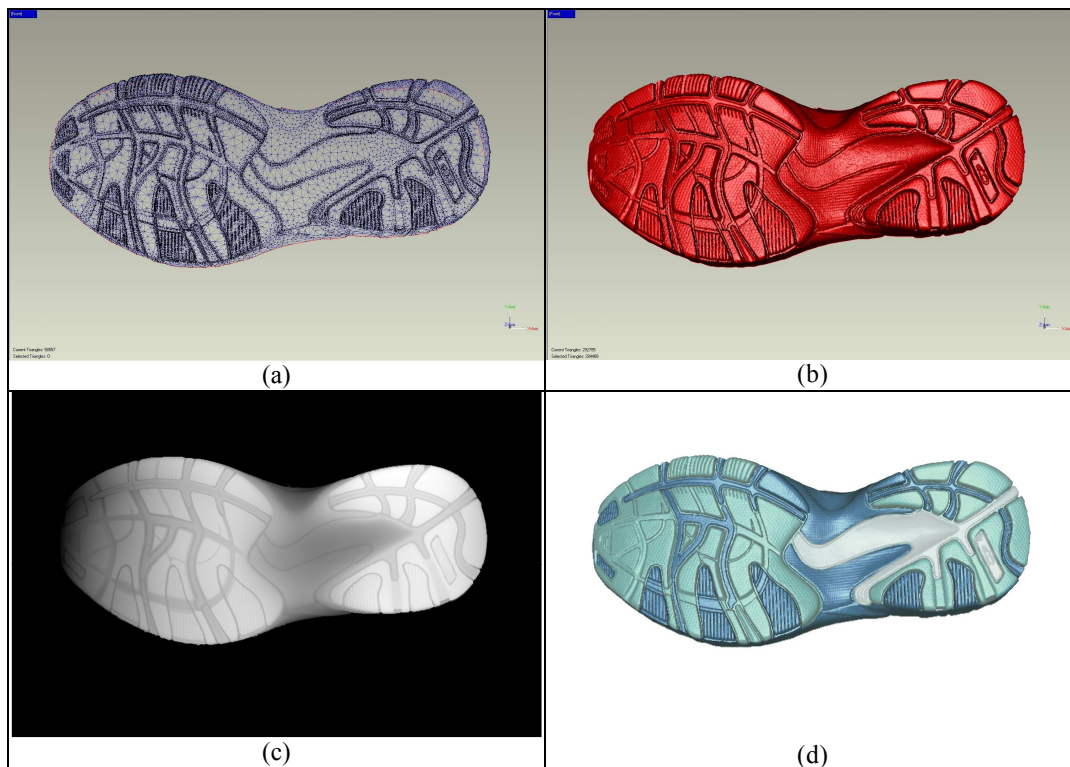
Una superficie puede ser suave en el sentido matemático, pero ser no satisfactoria desde el punto de vista estético. La superficie puede parecer adecuada desde el punto de vista estético si se tiene un contorno visualmente suave, (libre de detalles innecesarios tales como ruido u oscilaciones), lo cual es difícil de definir en términos técnicos. La forma más sencilla de probar la suavidad de una superficie es observarla bajo un programa de realismo virtual aplicando luz y sombreado. La iluminación local de un

vértice depende de la posición de la fuente de luz, de la normal de la superficie y de la localización del punto de vista del usuario.

La superficie producto de la digitalización debe ser primero convertida en volumen cerrado para incorporarlo a un programa de fotorealismo (render). La técnica de la gran mayoría de estos sistemas para generar las características ópticas de una escena es calcular el vector de las fuentes de luz en términos de los valores de reflexión de ésta en cada uno de los materiales de los objetos. Los diferentes efectos ópticos se integran de manera aditiva por canales separados. Dado que la geometría es producto de una digitalización, los valores de desplazamientos puntuales son innecesarios (displacement map), pero los valores de acentuación óptica en la reflexión de la luz (bump map) pueden ser provocados con el canal de mapa de alturas al 30%. Para conseguir las regiones de diferentes colores de la suela, se fabricó una mapa difuso de textura (diffuse color) al 100%. Los aspectos adicionales que se incorporaron fueron:

- Mapeo (texturizado) sobre las superficies del modelo. Ver figura 11
- Tres fuentes de luz: 2 Spot y 1 Omnidireccional con valores de sombra
- Una cámara de tipo target
- Una geometría adicional para la mesa
- Propiedades adicionales de materiales (reflectancia, sombreado, etc.)
- Fondo ambiental

Finalmente se exportó la escena como archivo de imagen digital. (Ver figura 12) y en formato VRML para conservar las propiedades de textura.



**Fig. 11.** Componentes geométricos y propiedades ópticas de fotorealismo. (a) objeto en malla triangular, (b) conversión a volumen cerrado, (c) mapa de alturas (bump map) y (d) mapa difuso de textura.



**Fig. 12.** Escena virtual de la versión final de la suela del calzado deportivo.

#### 4) FABRICACIÓN 3D EN PROTOTIPO RÁPIDO

La forma más directa y natural de entender la realidad virtual es transformarla en un objeto físico. Los sistemas de manufactura 3D hacen posible la conversión de modelos virtuales (usualmente en formato VRML) en contrapartes físicas, transformando archivos 3D en algo más complejo y familiar: objetos geométricos, texturas de superficies, cámaras (puntos de visualización). El archivo VRML del modelo de la suela se fabricó en una máquina de prototipos rápidos. El procedimiento de impresión incluye las siguientes operaciones: importar la geometría en el formato adecuado, rotar, escalar y justificarla para optimizar el tiempo y uso de la impresora; imprimir, extraer, limpiar, curar, y finalmente hornear para obtener propiedades mecánicas mejoradas.

Como modelo de prueba, se imprimió un molde a escala. El molde se utilizó para fabricar una suela de caucho como se muestra en la figura 13.



Fig. 13. Fotografía del molde fabricado en prototipos rápidos y una preproducción en caucho.

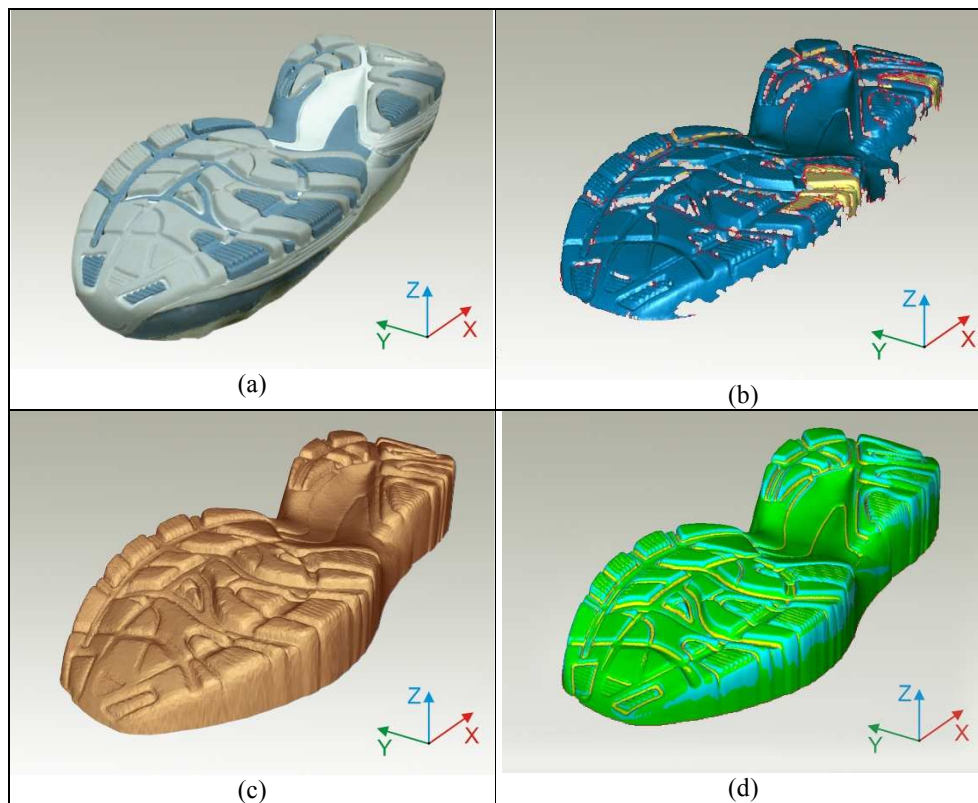
#### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la factibilidad de crear geometrías de productos utilizando un escáner 3D. Se demostró que es posible realizar este tipo de trabajos con un resultado aceptable, con un buen nivel de detalle y fidelidad con respecto a los modelos originales. En la pieza resultante de la impresora de prototipos rápidos se puede observar un nivel de detalle aceptable.

El procedimiento de captura de la geometría puede resumirse como se muestra en la figura 14. Esta fue la etapa más ardua e intensiva del trabajo. La geometría es el punto de partida para la construcción de prototipos y la de escenas de presentación virtual de productos.

Los modelos 3D pueden ser usados como medio de soporte para archivar e integrar la información de restauración de piezas [13], recuperación de planos de construcción y mejora de productos en donde no se tiene la información de diseño.

Cuestiones emergen al determinar cómo utilizar la información multimedia en estos casos para presentar los objetos, visualizarlos y ponerlos a disposición no solamente de los productores, sino también al público en general. Esta información relaciona la localización espacial con valores sociales y permiten indexar, almacenar, relacionar y visualizar valores culturales [14]. Uno objetivo adicional de la digitalización de objetos es generar una variedad de creaciones de arte tales como dibujos, pinturas, esculturas y animaciones. Desarrollar técnicas y métodos requiere de un buen entendimiento de abstracción, simplificación y -¿por qué no?- exageración.



**Fig. 14.** Procedimiento de construcción geométrica. (a) pieza original, (b) malla triangulada resultado de la nube de puntos, (c) reconstrucción preliminar en fotorealismo y (d) análisis de curvatura de la geometría resultante.



## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado en el marco de la línea de generación y aplicación de conocimiento LGAC L2: "Optimización geométrica de productos" del Cuerpo Académico Sistemas Integrados de Manufactura de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL con el apoyo financiero de la misma.

## EQUIPO UTILIZADO

Para la captura y digitalización geométrica, así como la fabricación del prototipo se usó equipo de las instalaciones de la División de Mecánica de la FIME/UANL.

La digitalización geométrica fue realizadas con una máquina de coordenadas manual certificada marca FARO modelo "Platinum Arm P0805" de 19,200 mediciones/segundo, con una exactitud de 50µm (0.002 pulgadas) y repetibilidad  $\pm 50\mu\text{m}$ ,  $2\sigma$  ( $\pm 0.002$  pulgadas). Las licencia de software para el tratamiento de puntos fué Geomagic Studio v10 y para el fotorealismo Photoshop CS3 y 3DMAX v8.

Para la fabricación en prototipo rápido se utilizó una impresora 3D de la compañía ZCorp, modelo Spectrum Z510 con capacidad de construcción de 2 capas por minuto y un volumen de trabajo de 254 x 356 x 203 mm, con resolución de 600 x 540 dpi.

## REFERENCIAS

- [1] R.A. Johnston, K. Barnes, T. Lovell-Smith and N.B. Price. "Use of a Hand-held Laser Scanner in Palaeontology: A 3D Model of a Plesiosaur Fossil". Image and Vision Computing '04 New Zealand 21-23 November 2004 Akaroa, New Zealand
- [2] Y.L.A. Lam. "3D Scanning of Cuneiform Tablets: Capture and Interactive Delivery". Technical report, University of Birmingham, June 2001.
- [3] López, Carmelo; Alcalá, Luis; Berges, Luis; Yoldi, Víctor; Cobos, Alberto; Royo, Rafael. "Nuevas perspectivas en la reconstrucción de dinosaurios 3D". XVII CONGRESO INTERNACIONAL INGEFRAF – ADM, Junio de 2005.
- [4] R. Fontana, M. Greco, M. Materazzi, E. Pampaloni, L. Pezzati, C. Rocchini, R. Scopigno, "Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo", J. of Cultural Heritage, vol. 3 n. 4, p.325-331, 2002
- [5] P. K. Allen, I. Stamos, A. Troccoli, B. Smith, M. Leordeanu and Y. C. Hsu, "3D Modeling of Historic Sites using Range and Image Data", International Conference of Robotics and Automation, Taipei, September 2003, pp. 145-150
- [6] C. Wallraven, M. Breidt, D. Cunningham, And H. Buelthoff. "Evaluating the Perceptual Realism of Animated Facial Expressions". ACM Transactions on Applied Perception, Vol. 4, No. 4, Article 23, January 2008.
- [7] K. Kähler, J. Haber, H. Seidel. "Reanimating the Dead: Reconstruction of Expressive Faces from Skull Data". SIGGRAPH conference proceedings 22(3):554-561, July 2003.
- [8] Marco Andreetto, Nicola Brusco. "Automatic 3D modeling of palatal plaster casts" Proceedings of the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'03) 2003 IEEE.
- [9] M. Hofer and H. Pottmann. "Orientierung von Laserscanner-Punktwolken". Vermessung & Geo-information, 91:297-306, 2003.
- [10] B. Merry, P. Marais, J. Gain. "Compression of dense and regular point clouds". AFRIGRAPH 2006, Cape Town, South Africa, 25-27 ACM 1-59593-288-7/06/0001 January 2006.
- [11] Katz, S., Tal, A., Basri, R. 2007. "Direct Visibility of Point Sets". ACM Trans. Graph. 26, 3, Article 24 (July 2007)..
- [12] N. Mitra, N. Gelfan, H. Pottmann, L. Guibas. "Registration of Point Cloud Data from a Geometric Optimization Perspective". Eurographics Symposium on Geometry Processing, p22-31. (2004)
- [13] Hao-tian Wu, Yiu-ming Cheung. "Public Authentication of 3D Mesh Models". Proceedings of the 2006 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence. 0-7695-2747-7/06.
- [14] Lesk, M. "Managing 3D: Our Next Problem". MIR'07, September 28-29, 2007, Augsburg, Bavaria, Germany. ACM 978-1-59593-778-0/07/0009.

## **AUTORES**

### **López Guerrero, Francisco Eugenio**

Ingeniero Mecánico Electricista e Ingeniero en Control y Computación de la UANL, Maestro en Ciencias de la Administración con especialidad en Sistemas por la misma Universidad, durante estos estudios participó en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania en donde desarrolló su tesis de maestría. Doctor en Ingeniería de materiales en la Universidad Autónoma de Nuevo León trabajando en conjunto con el Departamento de Materiales y Automatización de la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la FIME. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”, así como también de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica SOMIM.  
[elopez@mail.uanl.mx](mailto:elopez@mail.uanl.mx)

### **Ramírez Cruz, Francisco**

Ingeniero Mecánico Electricista, Maestro en Ciencias de la Mecatrónica en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Dirigió el Departamento de Somatoprótesis de la Facultad de Medicina de la UANL. Doctor en Ingeniería de Materiales en la Universidad Autónoma de Nuevo León trabajando en conjunto con el Departamento de Materiales y Automatización de la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”.  
[ramirez@mail.uanl.mx](mailto:ramirez@mail.uanl.mx)

### **Ávila Cabrera, Adán**

Ingeniero Mecánico y Maestro en Ciencias de la Administración con especialidad en Producción y Calidad de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL. Tecnólogo en Mecatrónica por el CIDESI (Unidad Querétaro). Profesor de tiempo completo de la División de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Es colaborador del Cuerpo Académico “Enseñanza de las Ciencias Básicas en Ingeniería”.