

## RECONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA Y DISCRETIZACIÓN CON ELEMENTOS FINITOS DEL COMPLEJO CRÁNEO-MANDIBULAR DEL DINOSAURIO *CARNOTAURUS SASTREI*

Adrián P. Csilino<sup>a</sup>, Gerardo V. Mazzetta<sup>b</sup> y Néstor Calvo<sup>c</sup>

<sup>a</sup> División Soldadura y Fractomecánica, INTEMA- Universidad Nacional de Mar del Plata  
Av. Juan B. Justo 4302 (7600) Mar del Plata, Argentina – E-mail: [csilino@fi.mdpu.edu.ar](mailto:csilino@fi.mdpu.edu.ar)

<sup>b</sup> Departamento de Paleontología, Facultad de Ciencias. Universidad de la República  
Iguá 4225 (11400) Montevideo, Uruguay – E-mail: [mazzetta@fcien.edu.uy](mailto:mazzetta@fcien.edu.uy)

<sup>c</sup> Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC), Univ. Nacional del  
Litoral Güemes 3450 (3000) Santa Fe, Argentina – E-mail: [ncalvo@ceride.gov.ar](mailto:ncalvo@ceride.gov.ar)

**Resumen.** Se presenta en este trabajo el proceso de reconstrucción de la geometría y discretización con elementos finitos del complejo cráneo-mandibular del dinosaurio carnívoro *Carnotaurus sastrei*. El ejemplar corresponde a la porción cefálica de un esqueleto articulado colectado en Departamento de Telsen, Provincia del Chubut, Argentina.

La geometría del cráneo y mandíbula fue relevada mediante tomografía computarizada, obteniéndose un total de 130 imágenes (116 interesando a la mandíbula) en planos de sección transversales al eje longitudinal del cráneo. Estas imágenes fueron editadas con el fin de obtener siluetas que reproduzcan la más probable geometría del animal en vida.

Se procedió luego a la obtención de puntos a partir de las siluetas. Para ello se superpuso una grilla estructurada con la que se obtuvieron puntos en el dominio y el contorno de cada una de ellas. Con estos puntos se construyó una malla de tetraedros mediante la técnica de *Extended Delaunay Tessellation* que reconstruye la superficie utilizando un algoritmo de *Alpha Shapes*. La geometría resultante presentó una clara discontinuidad, a modo de “saltos” en la dirección perpendicular a las secciones, la que fue corregida mediante la aplicación de un algoritmo de relajación a las coordenadas de los nodos de superficie.

**Palabras clave:** Reconstrucción geométrica; Discretización con elementos finitos; *Alpha Shapes*; Algoritmo de relajación de coordenadas; *Carnotaurus*; Dinosauria.

## 1 INTRODUCCIÓN

*Carnotaurus sastrei* es un muy interesante e inusual dinosaurio terópodo del Cretácico de la Patagonia<sup>1, 2, 3</sup>. *Carnotaurus*, toro carnívoro, en referencia a la presencia de un par de robustos apéndices frontales y carnivoría; *sastrei*, en dedicatoria al Sr. Sastre, propietario de la estancia en donde se produjo su hallazgo. El holotipo (MACN-CH 894) corresponde a un esqueleto articulado casi completo con una longitud total estimada en aproximadamente 8 m. El mismo carece de la parte medial y distal de la cola, de la parte central y distal de las tibias, ambas fibulas y huesos de los pies. El holotipo también incluye impresiones de su piel. Dicho ejemplar fue colectado en la Estancia “Pocho Sastre” (cerca de Bajada Moreno, Departamento de Telsen, Provincia del Chubut, Argentina), en sedimentos correspondientes a la sección inferior de la Formación La Colonia, Cretácico inferior-superior (Albiano-Cenomaniano), con una antigüedad de aproximadamente 100 millones de años. El material holotípico de *Carnotaurus sastrei* se encuentra depositado en el Museo Argentino de Ciencias Naturales “Bernardino Rivadavia”, donde también puede apreciarse una réplica de su esqueleto a tamaño natural.

*Carnotaurus* es hasta el presente el dinosaurio carnívoro con mejor y más completo grado de preservación en su material esquelético descrito para los continentes gondwánicos. Ello ha permitido construir un modelo a escala que reproduce confiablemente la morfología del animal en vida. A partir de tal modelo se ha estimado su masa corporal en 1600 kg, considerando una densidad corporal global de 1000 kg/m<sup>3</sup> (Ref. 3). A pesar de ser conocido el hecho de que algunos terópodos presentan estructuras óseas en el cráneo (como crestas longitudinales en *Syntarsus*, *Dilophosaurus* y *Cryolophosaurus*, o la presencia de un cuerno nasal en *Ceratosaurus* y *Proceratosaurus*, éste es el único ejemplo descrito de un vertebrado cursorial carnívoro provisto de un par de robustos cuernos frontales (Fig. 1). Los mismos están conformados por una corta y robusta expansión láterodorsal de cada frontal. La mandíbula es baja y elongada, presentando una gran ventana mandibular localizada inmediatamente por delante de una amplia fosa aductora. Esta última se dispone sobre la cara medial de la mandíbula y proporciona inserción a la musculatura responsable del cierre de la mandíbula.

Se presenta en este trabajo el proceso de reconstrucción de la geometría y discretización con elementos finitos del complejo cráneo-mandibular del dinosaurio carnívoro *Carnotaurus*. El modelo de elementos finitos será utilizado para estudiar las sollicitaciones mecánicas del cráneo y la mandíbula y poder así inferir las posibles estrategias alimentarias y agonísticas empleadas por el animal.



Figura 1. Restauración en vida del dinosaurio carnívoro *Carnotaurus sastrei* (ilustración de Luis V. Rey) y vista lateral izquierda de su cráneo.

## 2 BARRIDO TOMOGRÁFICO Y EDICIÓN DE LA GEOMETRÍA

El tomógrafo utilizado para el estudio del cráneo y mandíbula de *Carnotaurus* es un *General Electric*, modelo *Prospeed Hilight*, de tipo helicoidal de detector simple (Yokohama, Japón). Las imágenes tomográficas se obtuvieron en el formato *Digital Imaging and Communications in Medicine* (DICOM), el cual es comunmente utilizado para el

almacenamiento y transferencia de imágenes médicas. Los archivos de imagen con formato DICOM pueden ser vistos mediante muchos de los programas de visualización que se ofrecen en la Internet (por ejemplo, el programa ezDICOM). El detalle de los datos técnicos de adquisición de las imágenes pueden leerse en el encabezado (*Header*) de cada una de las imágenes DICOM. En dicho encabezado se indica el espesor de la separación entre cortes consecutivos (*Slice Thickness*) con el cual se determina el tamaño del voxel. El soporte informático del tomógrafo realiza una reconstrucción que permite obtener imágenes intermedias entre cortes sucesivos (obteniéndose así un total de 130 imágenes transversales al eje longitudinal del cráneo, de las cuales 116 interesan a la mandíbula). Como resumen de los datos técnicos del estudio del cráneo y mandíbula de este dinosaurio puede decirse que el mismo se realizó a través de cortes de 10 mm de espesor, moviendo la mesa del tomógrafo a razón de 20 mm/seg (*pitch* 1:2) y realizando reconstrucciones cada 5 mm. El diámetro de reconstrucción de los cortes (*FOV*) usado fue de 50 mm (diámetro máximo permitido por el equipo), el cual genera un artefacto (imagen no real) circular periférico en las imágenes obtenidas (Fig. 2a).

Estas imágenes fueron importadas a un formato de mapa de bits (*bmp*) y posteriormente editadas con el fin de obtener siluetas que reproduzcan la más probable geometría cráneo-mandibular del animal en vida, eliminando todas aquellas pequeñas deformaciones por compresión detectadas en el material original y producto del proceso de fosilización. A modo de ejemplo se ilustra en la Fig. 1 la imagen obtenida de la tomografía con la silueta resultante luego de su edición. El trabajo de edición se limitó a la mitad derecha de las imágenes debido a la simetría bilateral de la geometría craneana y mandibular.

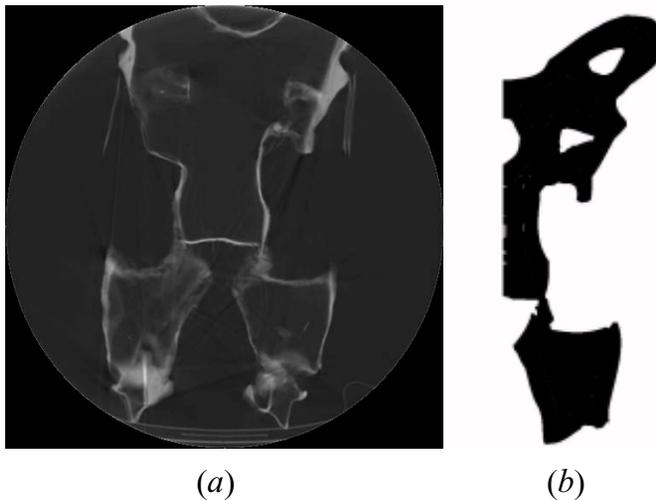


Figura 2. Corte frontal del cráneo de *Carnotaurus*: (a) imagen tomográfica; (b) imagen editada.

### 3 OBTENCIÓN DE LOS PUNTOS Y CONSTRUCCIÓN DE LA MALLA DE TETRAEDROS

Posteriormente a la edición de las imágenes se procedió a la obtención de puntos para la construcción de la malla de tetraedros. Para ello se superpuso una grilla regular sobre cada una de las siluetas, a partir de la cual se obtuvieron puntos en el dominio y en el contorno, como se ilustra en la Fig. 3. Los puntos en el dominio corresponden a las intersecciones de las líneas horizontales y verticales de la grilla mientras que los puntos sobre el contorno están dados por las intersecciones de las líneas de la grilla con el borde de la silueta. Con el objeto de poder adaptar el tamaño de la grilla para las distintas zonas de los cortes estas fueron identificadas con diferentes tonos de gris (Fig. 3). Finalmente se adoptó para este trabajo un grillado de 2,76 mm (6 pixeles) para la zona negra ubicada sobre la periferia, y un grillado de 3,68 mm (8 pixeles) en la zona gris interior. De esta forma resultaron 98480 puntos para el cráneo y 28164 puntos para la mandíbula.

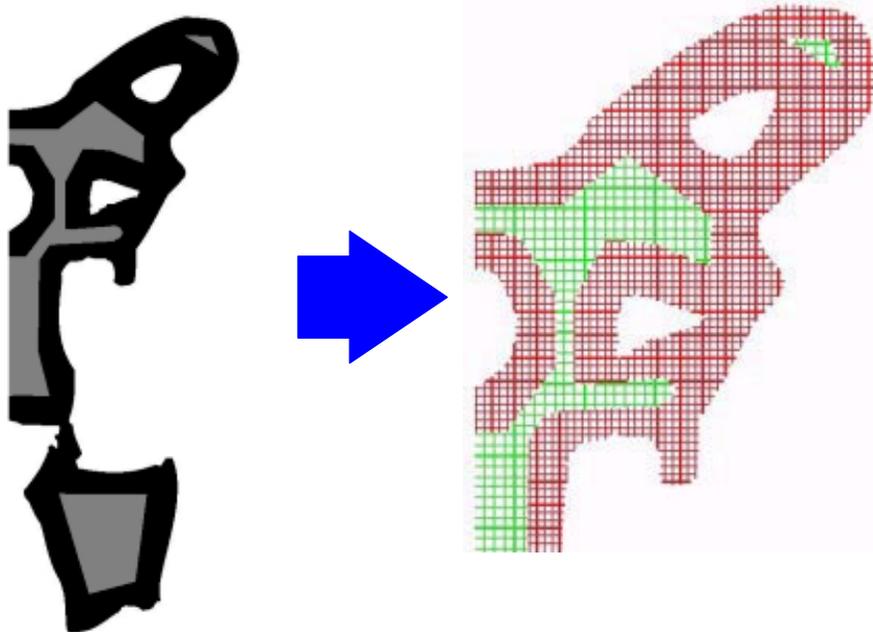


Figura 3. Procedimiento para la obtención de los puntos utilizados en la construcción de la red de tetraedros.

La malla de tetraedros se construyó utilizando la técnica de *Extended Delaunay Tessellation*<sup>4</sup> que reconstruye la superficie utilizando un algoritmo de *Alpha Shapes*<sup>5</sup>. Los mejores resultados se obtuvieron fijando el valor de máximo radio interior en 4 mm. Las discretizaciones resultantes constan de 489150 tetraedros para el cráneo y 144573 para la mandíbula. Una vista de cada una de ellas se presenta en las Figs. 4 y 5.



Figura 4. Red de tetraedros (elementos y *render*) resultante de la *Delaunay Tessellation* de la mandíbula de *Carnotaurus*.

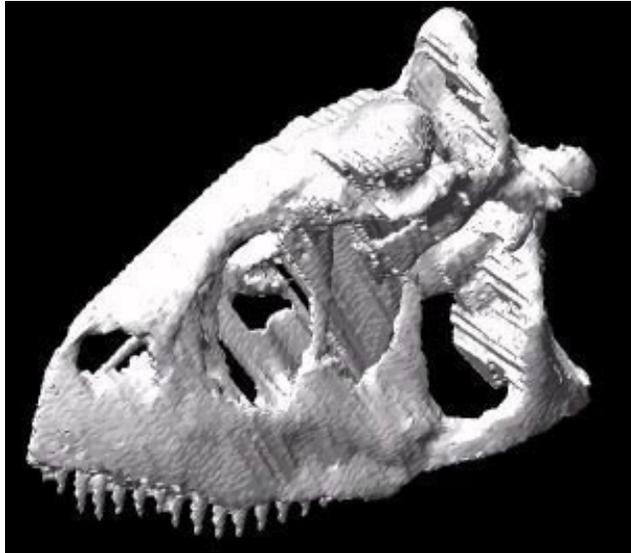
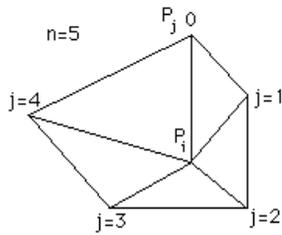


Figura 5. Red de tetraedros (*render*) resultante de la *Delaunay Tessellation* del cráneo de *Carnotaurus*.

#### 4 SUAVIZADO DE LA SUPERFICIE

Como puede observarse en las Figs. 4 y 5, las geometrías discretizadas presentan una clara discontinuidad, es decir, “saltos” en la dirección perpendicular a las secciones. Esto es una clara consecuencia del proceso utilizado en su construcción. Este defecto fue corregido mediante la aplicación de un algoritmo de relajación de coordenadas a los nodos en la superficie. En general el algoritmo utilizado tiende a preservar las principales características de la geometría tratada, y al mismo tiempo, procura conseguir elementos de igual tamaño sobre su superficie. El mismo puede ser aplicado en forma iterativa para suavizar la superficie hasta el grado deseado.

El principio en que se basa el algoritmo se describe a continuación. Consideremos un punto  $P_i$  rodeado por  $n$  vértices  $P_j$  que definen los elementos que comparten el punto  $P_i$ .



La coordenada del punto \$P\_i\$ es entonces perturbada de acuerdo al siguiente criterio:

$$P'_i = P_i + \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} (P_j - P_i)$$

El algoritmo fue aplicado sólo dos veces a cada una de las geometrías, a excepción de la zona de los dientes y el plano de simetría. Se observó que a partir de la tercera iteración el algoritmo comenzaba a introducir cambios significativos en la geometría del modelo. En la Figs. 6 y 7 se ilustra la geometría resultante para la mandíbula luego de la primera y segunda iteración. La Fig. 8 corresponde a la geometría final del cráneo.



Figura 6. Geometría de la mandíbula de *Carnotaurus* luego de la primera iteración de suavizado.



Figura 7. Geometría de la mandíbula de *Carnotaurus* luego de la segunda iteración de suavizado.



Figura 8. Geometría final del cráneo de *Carnotaurus* luego de dos iteraciones de suavizado.

## 5 SUMARIO Y CONCLUSIONES

Se presentó en este trabajo una metodología para la reconstrucción geométrica y discretización con elementos finitos del complejo cráneo-mandibular del dinosaurio *Carnotaurus sastrei* a partir de imágenes tomográficas computarizadas. Las imágenes tomográficas fueron editadas para obtener las siluetas que reproducen la más probable geometría cráneo-mandibular del animal en vida. A partir de éstas se obtuvieron puntos sobre el contorno y el interior de las siluetas mediante la superposición de una grilla estructurada. Con estos puntos se construyó una malla de tetraedros mediante la técnica de *Extended Delaunay Tessellation* que reconstruye la superficie utilizando un algoritmo de alpha shapes. La geometría presentó una clara discontinuidad en la dirección del barrido tomográfico, la que fue corregida mediante la aplicación de un algoritmo de relajación a las coordenadas de los nodos sobre la superficie. La metodología implementada ha demostrado ser versátil, permitiendo reconstruir y discretizar una geometría compleja como la correspondiente a la entidad biológica considerada. El modelo de elementos finitos será utilizado para estudiar las sollicitaciones mecánicas del cráneo y la mandíbula y poder así inferir los hábitos del animal.

## AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro reconocimiento a José Bonaparte por el préstamo del calco del cráneo y mandíbula correspondiente al holotipo de *Carnotaurus sastrei*, y a Federico Dalla Torre por su asistencia técnica durante la generación de las imágenes tomográficas computarizadas de los mismos. El trabajo de A. P. C. y N. C. fue financiado por el Concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), y el de G. V. M. parcialmente por el Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA).

## 6 REFERENCIAS

- [1] Bonaparte, J. F. A horned Cretaceous carnosaur from Patagonia. *National Geographic Research* 1: 149-151 (1985).
- [2] Bonaparte, J. F., Novas, F. E., & Coria, R. A. *Carnotaurus sastrei* Bonaparte, the horned, lightly built carnosaur from the Middle Cretaceous of Patagonia. *Contributions in Science*, Los Angeles County Museum 416: 1-42 (1990).
- [3] Mazzetta, G. V., Fariña, R. A., & Vizcaíno, S. F. On the palaeobiology of the South American horned theropod *Carnotaurus sastrei* Bonaparte. In: *Aspects of Theropod Paleobiology*. Special Volume (B. P. Pérez-Moreno, T. R. Holtz Jr., J. L. Sanz, and J. J. Moratalla, eds.). *Gaia* 15: 185-192 (2000).
- [4] Calvo, N., Idelsohn, S. R., & Oñate, E. The Extended Delaunay Tessellation. *Comp. Meth. in Applied Mech. and Engineering* (en revisión).
- [5] Edelsbrunner, H., & Mucke, E. P. Three-dimensional alpha shapes. *ACM Transactions on Graphics* 13: 43-72, (1994).