

INVESTIGACIÓN

Realidad virtual. Su aplicación en cirugía reconstructiva oncológica esquelética

Presentación de un caso de osteosarcoma tibial

LUCAS E. RITACCO,¹ FEDERICO MILANO,² LUIS APONTE TINAO,⁴ MARCELO RISK,²
MAURICIO REYES,³ STEFAN WEBER,³ GERMÁN FARFALLI,⁴ MIGUEL AYERZA,⁴
D. L. MUSCOLO⁴ y FERNÁN GONZÁLEZ BERNALDO DE QUIRÓS¹

¹Departamento de Informática en Salud, Hospital Italiano de Buenos Aires, Argentina

²Laboratorio de Sistemas Complejos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires, Argentina

Hospital Italiano de Buenos Aires, Argentina

³Universidad de Berna, Suiza

⁴Departamento de Oncología Ortopédica y Reconstrucciones Óseas, Fundación Carlos E. Ottolenghi

RESUMEN

Introducción: Una de las promesas de la era informática se suscita desde la investigación *in silico* (investigación asistida por computadora).

En el presente trabajo nos propusimos crear un modelo 3D *in silico* de un caso clínico real, imprimirlo en 3D y navegar una osteotomía previamente planeada.

Materiales y métodos: Se presenta el caso de un paciente de 11 años con diagnóstico de osteosarcoma localizado en la metafisis proximal de la tibia izquierda. Se practicó la planificación tridimensional a partir del procesamiento de las imágenes correspondientes a la tomografía y la resonancia magnética. La resección y la reconstrucción se practicaron siguiendo el modelo virtual creado.

Resultados: La planificación tridimensional pudo ser creada. Fue posible reproducir un modelo 3D en un escenario virtual identificando hueso sano, tumor y márgenes oncológicos planificando y ejecutando una osteotomía biplanar.

Conclusiones: Es posible que la aplicación de estas técnicas en la práctica de la ortopedia general permita planificaciones virtuales preoperatorias en múltiples situaciones. De esta forma, contribuiría a disminuir la incidencia de fallas intraoperatorias imprevistas, contribuyendo a obtener procedimientos quirúrgicos predecibles, imple-

mentando así una nueva manera de realizar desarrollo, investigación y entrenamiento en ortopedia y traumatología mediante el uso de tecnología *in silico*.

PALABRAS CLAVES: Prototipado rápido. Cirugía asistida por computadora. Planificación tridimensional preoperatoria.

VIRTUAL REALITY. APPLICATION IN ONCOLOGIC SKELETAL RECONSTRUCTIVE SURGERY. PRESENTATION OF A TIBIAL OSTEOSARCOMA CASE

ABSTRACT

Background: One of the major challenge for orthopedic surgery is to create a preoperative plan in a 3D virtual space and reproduce it in a 3D model.

Thanks to rapid prototyping (RP) models, we can build a three-dimensional scaled bone model with a tumor inside.

Our objective was to obtain segmented images from a tibial bone, with a tumor. Next, determine safe margins inside, in order to create a preoperative 3D plan. Then, print a RP model, with colors inside, and reproduce the surgery (simulation) with a navigation system. The feasibility of such procedure is based on our hypothesis, that it is possible to simulate an *in vitro* scenario for bone tumor surgery, and apply complex osteotomies with navigation, thus preserving healthy tissue.

Methods: An 11-year old patient with knee pain, and proximal tibia osteosarcoma diagnosed by biopsy, was scanned with CT Multislice. The preoperative planning was applied using a 3D simulation platform. Two planes

Recibido el 2-12-2010. Aceptado luego de la evaluación el 29-3-2011.

Correspondencia:

Dr. LUCAS E. RITACCO
lucas.ritacco@hiba.org.ar

were created into the bone, one near the tumor, in red (3mm of unsafe margin), the other, far from the tumor, in blue (3mm of safe margin).

Our RP model was created using Z-printer Spectrum Z-510 and ZP131 powder in 1hour and 47 minutes. We printed the model in two halves, in order to print the inner colored structures, which were then attached with glue, thus obtaining the final RP bone model.

The preoperative plan was masked and exported from our 3D virtual platform to the navigator. The osteotomies were applied with Stryker Navigation System II, using the planned 3D virtual path. After performing the osteotomy, the piece was separated with a saw into the two original halves.

Results: The separated RP bone was used as an anatomic pathological simulated model. We could see the correct and wrong paths of the previously planned osteotomy in the 3D virtual scenario, applied with navigation.

Conclusions: This novel surgery-reproducing application, is a good training for surgeons, interested in the behavior of the navigation system in oncologic surgery, and in knowing how to perform the preoperative planning in a custom scaled model using a navigated rapid prototyping model. Other interesting benefits are: pre-bending the plates to the bone shape, apply and improve planned osteotomies, plan pins' position for navigation, and check the correct margins in order to avoid mistakes in a real surgery and save OR time with a full 3D preoperative plan, combining CAD software, RP-models and navigation.

KEY WORDS: Rapid prototyping. Computed-assisted surgery. 3D pre-op planning.

Uno de los desafíos de la ortopedia y traumatología ha sido la posibilidad de recrear un escenario de planeamiento preoperatorio contemplando el espacio tridimensional sin la necesidad de usar piezas cadavéricas y ser capaz de reproducirlo en el mundo real. Gracias al advenimiento de nuevas tecnologías dentro de la era informática, nace un nuevo modelo de investigación *in silico*,¹¹ denominación que significa "hecho por computadora o mediante simulación computacional". Así como las frases *in vivo* e *in vitro* del latín se usan en biología de sistemas para referirse a experimentos realizados en organismos vivos o fuera de ellos, respectivamente, *in silicium* se traduce por "en silicio", lo cual hace referencia al material del que están hechos los semiconductores que permiten almacenar información en la computadora. Así, podemos realizar desarrollo e investigación en modelos tridimensionales virtuales que representan fielmente la realidad.

Otro avance tecnológico ha sido la posibilidad de imprimir reconstrucciones 3D en polvo solidificado utili-

zando las llamadas impresoras tridimensionales.³ De este modo podríamos reconstruir un escenario virtual visualizando el hueso, el tumor y los planos de osteotomías, y luego, imprimir dichas estructuras, mejor conocidas como modelos de prototipado rápido o modelos RP (del inglés *rapid prototyping*), dando la posibilidad al cirujano de tener en sus manos un modelo 3D en escala que representa fielmente el hueso del paciente. Como describimos más adelante, podremos utilizar nuestro modelo prototipado para simular una cirugía. Finalmente, y a manera de reproducción real, bajo los principios de navegación basados en imágenes (TC y RM),^{2,6,12,13} es posible realizar una correspondencia entre la estructura real del modelo RP y su reconstrucción 3D *in silico* en una computadora. Podremos así reproducir un plan virtual en un hueso prototipado.

Los principales objetivos del presente trabajo consistieron en demostrar si es posible:

1. Crear un modelo tridimensional en un escenario virtual a partir de imágenes de tomografía y de resonancia magnética que sea capaz de simular la morfología de la estructura ósea, el tumor y los márgenes oncológicos pudiendo obtener una planificación tridimensional virtual.
2. Imprimir un prototipo 3D (tibia proximal) en escala y representativo de un paciente oncológico en el que se contemplen el tejido óseo sano, el tejido tumoral y los márgenes oncológicos.
3. Utilizar dicho prototipo para ensayar osteotomías bajo guía navegada basada en imágenes.

Materiales y métodos

A. Planificación tridimensional virtual

La técnica de reconstrucción tridimensional incluye tres fases:

Fase de adquisición de imágenes (TAC y RMN)

Se utilizó un estudio de resonancia magnética convencional y una tomografía multipista de rodilla de un paciente de 11 años con clínica de dolor recurrente de rodilla como único síntoma y diagnóstico de osteosarcoma metafisario en la tibia proximal, constatado por biopsia, y tratado con resección tumoral transepifisaria y reconstrucción del defecto con aloinjerto estructural de banco.⁶

Mediante el protocolo tomográfico de adquisición: FOV: 32 cm, tamaño de píxel 0,625mm, KV 120, 100 mAs, espesor de corte 1 mm, altura y ancho de imagen (512 pxl x 512pxl) utilizando el tomógrafo Toshiba (Aquilion, Japón), las imágenes fueron digitalizadas en formato DICOM (*Digital Imaging and Communication in Medicine*).

Para la adquisición de imágenes digitales de resonancia se utilizó el protocolo FOV: 32 cm, tamaño de píxel 0,750, espesor de corte 1 mm, altura y ancho de imagen (256 pxl x 256 pxl) en el tiempo T1 utilizando el resonador Siemens (Avanto, Alemania).

Fase de segmentación de imágenes

Una vez obtenidos los archivos de imágenes, el objetivo es eliminar, mediante un *software*, los elementos que no sean hueso y que en las imágenes puedan simularlo. Esto se obtiene estableciendo una valoración colorimétrica (en la Fig. 1 representada en verde y amarillo), que elimina otros elementos como cartílago, músculo, grasa, piel u otros que no pertenecen al hueso: plomo del tomógrafo, etc. Este procedimiento lo realiza el operador en forma manual y determina la reconstrucción final del hueso, eliminando estructuras ajenas al tejido óseo que pueden alterar la forma anatómica de este.

El tejido óseo se segmenta a partir de la tomografía y el tejido tumoral, a partir de resonancia magnética desde un molde que permite fusionar ambos estudios en el lugar adecuado.

Fase de reconstrucción tridimensional y planeamiento

Una vez segmentado todo el volumen de imágenes bidimensionales, se transforma dicho volumen en una estructura ósea tridimensional dentro de un escenario virtual.

Obteniendo un escenario virtual tridimensional, contamos con todos los ejes del espacio: X-Y-Z.⁹ Esto implica un avance en la manera de medición previamente utilizada con imágenes tomográficas y de resonancia bidimensionales, obteniendo un hueso virtual tridimensional que pretende reproducir la realidad. De esta manera, se obtiene la morfología ósea y el tumor como una estructura en un espacio virtual.

Acorde con el planeamiento preoperatorio propiamente dicho, se crearon dos planos de osteotomía virtuales de 3 mm de espesor coincidente con el espesor de la sierra de corte y su oscilación, calculando también la distancia del margen oncológico basado en el plano coronal originario correspondiente a las imágenes de resonancia magnética en el tiempo T1. Así, fue posible establecer un plano de corte 3D que contemplara la distancia entre el tejido tumoral y el margen oncológico necesario (Fig. 2).

B. Impresión del modelo RP

El modelo de prototipado rápido se creó utilizando la impresora Z-Printer Spectrum Z-510, tomando el tiempo de 1 hora 47 minutos de impresión. Nosotros imprimimos el modelo en dos mitades con el fin de poder incluir en su interior los colores que definieran el tumor y sus márgenes oncológicos. Se crearon dos planos en las cercanías del tumor: uno coloreado en rojo (margen inseguro de 3 mm) y el otro en azul (margen seguro de 3 mm); el



Figura 1 A. Resonancia magnética donde se observa una lesión tumoral hiperintensa en la región proximal de la tibia. B. Tomografía computarizada. El área correspondiente al tumor fue resaltada con contorno negro y efecto esponja, mientras que el hueso sano aparece con contorno blanco. Este proceso se repite en cada uno de los cortes.

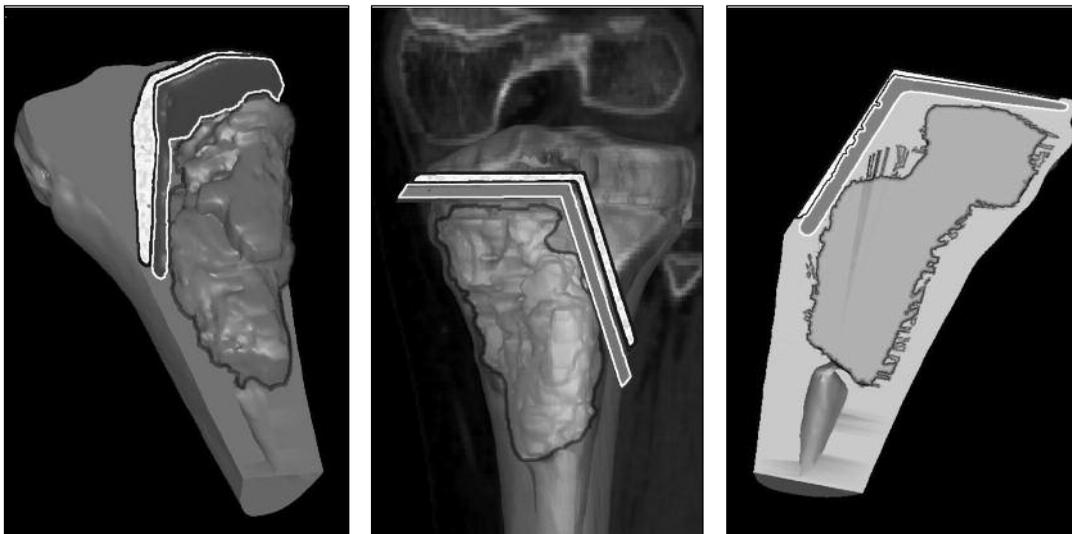


Figura 2. Modelo de planificación tridimensional *in silico*. El plano de corte blanco y borde negro representa el margen oncológico seguro. El plano de corte con borde blanco representa el margen oncológico inseguro.

tumor fue coloreado en verde mientras el resto de la estructura correspondiente a tejido sano, en blanco.

La manera en que trabaja la impresora consiste fundamentalmente en derramar una película de 0,1 mm de polvo ZP131 sobre una base de más polvo (plana) de 2 cm de espesor. A continuación, se imprime un adhesivo líquido sobre esa delgada película dejando la forma de la primera capa del objeto en estudio (tibia proximal), que se corresponderá a una sección biplanar de 0,1 mm de espesor del mismo. Este acto se repite consecutivas veces hasta obtener la pieza terminada. En nuestro trabajo, imprimimos la tibia en dos mitades.

Debido a la fragilidad que presentaba la pieza recién fabricada, el paso siguiente consistió en la fijación estructural con isocinato, polirol y acetona. Luego, ambas mitades fueron adheridas entre sí con el pegamento Z-Bond 101 (Fig. 3). La validación de la precisión de la pieza impresa se llevó a cabo midiendo cuatro distancias *in silico* y comparándolas en el modelo RP creado.

C. Navegación basada en imágenes

Una vez preparado el modelo RP, se lo fijó con una morsa a una mesa de trabajo. El plan quirúrgico preoperatorio *in silico* 3D fue cargado en el sistema de navegación de *Stryker Navigation System II* (Fig. 4). Luego, se procedió a la colocación de un rastreador de superficie infrarrojo (*tracker*), fijándolo de manera firme al modelo RP con dos pines y una rótula (Fig. 5). Este dispositivo genera un sistema de coordenadas 3D circundantes a un área de interés determinada que permite orientar el navegador y de este modo hacer coincidir el esquema 3D preoperatorio con el modelo RP.

Queda así el modelo listo para ser osteotomizado con herramientas navegadas. El mismo procedimiento se realizó en una sierra de corte con una hoja de 1,5 mm de espesor pero utilizando un gancho idóneo para fijar el rastreador, paso que permite ver el filo de la sierra y su trayectoria en tiempo real en el visor del equipo de navegación. De esta manera, el operario utilizó el plano virtual del corte planificado previamente en el escenario *in silico* y direccionó la sierra contemplando también los tres ejes del espacio.

Una vez realizada la osteotomía navegada, se abrió la pieza para constatar la correspondencia de la planificación virtual y el modelo RP.

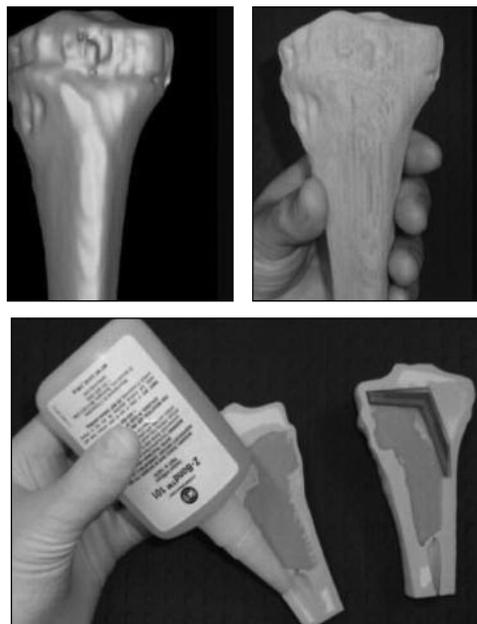


Figura 3. Modelo de planificación tridimensional *in silico* impreso como modelo RP.

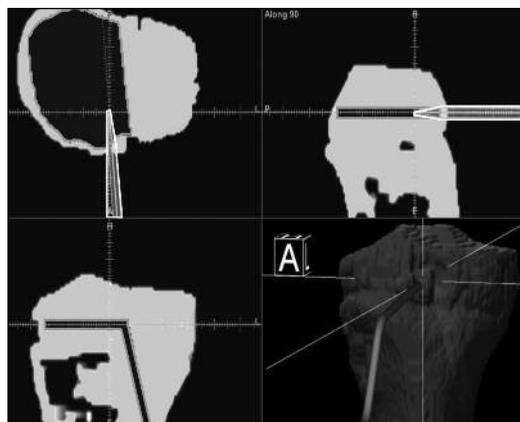


Figura 4. Mapa de corte tridimensional en tiempo real visualizado en el navegador durante el corte. El instrumento (borde blanco) corresponde a la hoja de la sierra. Se observa en gris el margen seguro.

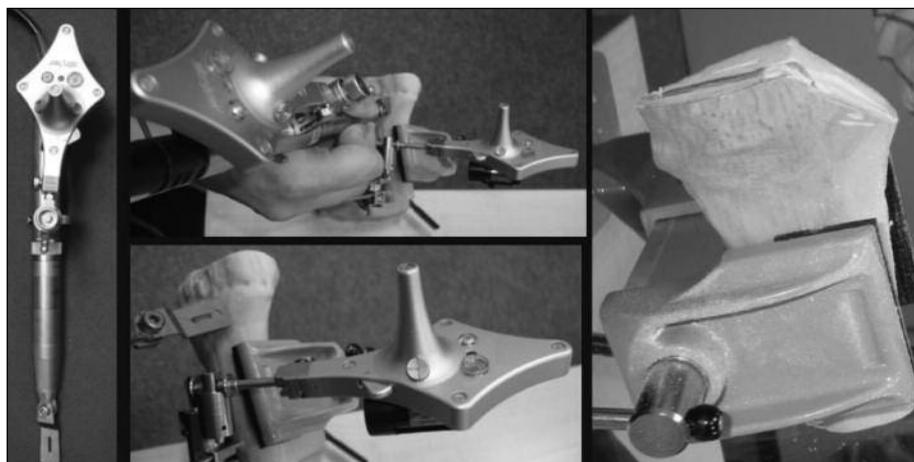


Figura 5. Sierra con registrador. El modelo RP es osteotomizado con una sierra, que tiene fijado un registrador para guiar la dirección del corte en forma navegada.

Resultados

Discusión

A. Planificación tridimensional virtual

Bajo la utilización de imágenes de resonancia magnética y tomografía, se realizó la segmentación de estructuras óseas y tumorales. Se pudo así construir una pieza 3D en un escenario virtual y realizar la planificación de los planos de osteotomía proximal y distal al tumor contemplando los márgenes oncológicos en colores (véase Fig. 2).

B. Impresión del modelo RP

Mediante la impresión del hueso en dos mitades pudimos crear una estructura sólida que se correspondió en tamaño y forma a lo observado en nuestro escenario virtual.

La validación de dicho procedimiento se realizó midiendo las diferencias entre cuatro distancias conocidas *in silico* contra las mismas en el modelo RP. Estas diferencias fueron: 0,5 mm para la medida A, 0,1 mm para la medida B, 0,3 mm para la medida C y 0,5 para la medida D. Consideramos entonces que nuestro modelo RP fue representativo del caso en estudio (Fig. 6C).

C. Navegación basada en imágenes

Utilizando una sierra navegada, pudimos reproducir nuestro plan preoperatorio virtual. Este fue validado abriendo la pieza y constatando su correlación con la planificación previa desarrollada *in silico*. Uno de los planos de la osteotomía biplanar se correspondió con el plano del margen seguro en toda su estructura (Fig. 6B). El otro, en cambio, si bien fue tangencial al planeado, discrepó en 1 mm del margen seguro hacia el lado sano. El margen inseguro, coloreado en rojo, mantuvo toda su integridad.

Si bien este tipo de tecnología ya fue usado en otras áreas anatómicas, como pelvis,¹ cirugía maxilofacial,⁸ cirugía de columna⁵ y cirugía cardíaca,¹⁰ no hemos encontrado trabajos en los que se cortaran con sierra modelos RP como parte del entrenamiento para navegación quirúrgica.

Por lo tanto, uno de nuestros interrogantes técnicos, antes de realizar el trabajo, era saber si el modelo RP podía soportar la oscilación de una sierra de ortopedia sin destruirse.

En nuestra experiencia de sólo dos casos, podemos afirmar que el material mantuvo su estructura hasta la finalización del experimento.

Tampoco encontramos literatura que citara la utilización de estas piezas en oncología ortopédica. Una de las limitaciones de nuestro trabajo es que el experimento con sierra navegada no se ha probado aún en pacientes, ya que la idea en primera instancia fue probar la aplicación y su funcionamiento en forma experimental.

Aprovechando la creación de un modelo RP retrospectivo, uno de nuestros desafíos fue también tratar de mejorar la cantidad de hueso sano preservado comparado con el llevado a cabo en la resección real, dejando así un mayor capital óseo en el paciente pero manteniendo siempre el margen de seguridad oncológico. Dicho objetivo también fue cumplido gracias al control tridimensional en nuestro planeamiento 3D y al control tridimensional aportado por el navegador durante la ejecución del corte constatado en el modelo RP con colores.

Actualmente, estamos trabajando en la validación y protocolización de estos métodos, que constituyen pilares que son, sin duda, indispensables para poder transformar estas herramientas en aplicaciones médicas útiles y que serán desarrolladas en detalle en trabajos futuros.

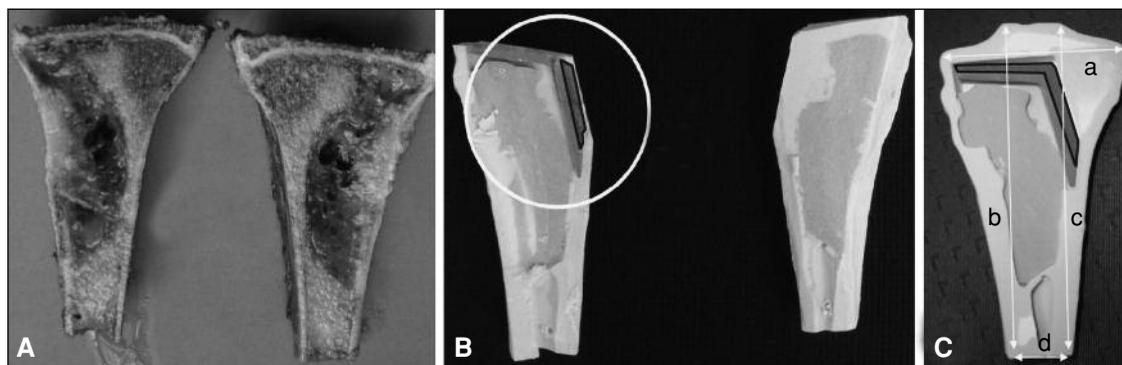


Figura 6. A. Anatomía patológica de un osteosarcoma de tibia. B. Modelo RP osteotomizado. En las figuras se puede apreciar la similitud entre la anatomía patológica y nuestro modelo RP. Obsérvese también la exactitud del corte coincidente con el plano de osteotomía con borde negro, que corresponde al margen seguro. C. Distancias de validación.

Conclusión

Poder combinar nuevas tecnologías nos brinda soluciones sobre todo en el planeamiento y diseño quirúrgico preoperatorio. Esta nueva manera de reproducir una cirugía es un modelo de entrenamiento para cirujanos interesados en conocer el comportamiento del planeamiento 3D y su reproducción mediante la navegación de osteotomías en oncología ortopédica.

Así, es posible ensayar cirugías desde modelos RP fabricados desde casos reales. Asimismo, otro beneficio de este conglomerado de tecnologías podría ser realizar

osteotomías multiplanares o dificultosas en deformidades de miembros, premoldeado en placas de osteosíntesis utilizando los modelos RP como molde guía,⁴ controlar los márgenes oncológicos a fin de evitar errores de corte en la cirugía real y, sobre todo, ahorrar tiempo quirúrgico con su cascada de efectos beneficiosos para el cirujano y el paciente.

A futuro continuaremos realizando desarrollos *in silico*, estudiando principalmente su validez y su reproducibilidad en un mayor número de casos.

La evaluación se llevará a cabo utilizando algunas de las herramientas expuestas en el presente trabajo.

Bibliografía

1. **Autorino CM, Burgo F, Ottolenghi J, Mengelle D, Parizzia W, Rolon A, Caldeiras M, Accardi J.** Aplicación en cirugía ortopédica de un sistema de prototipos rápidos con tecnología de impresión 3D en la Universidad Austral. Póster científico presentado en el 42° Congreso Argentino de Ortopedia y Traumatología. Buenos Aires, Argentina, diciembre de 2005.
2. **Cho HS, Kang HG, Kim HS, Han I.** Computer-assisted sacral tumor resection. *J Bone Joint Surg Am* 2008;90:1561-6.
3. **Gebhardt A.** *Rapid prototyping*. Carl Hanser Verlag, München, Wien; 2000.
4. **Kozakiewicz M, Elgalal M, Loba P, et al.** Clinical application of 3D pre-bent titanium implants for orbital floor fractures. *J Cranio-Maxillofacial Surg* 2009;37(4):229-34.
5. **Lu S, Xu YQ, Chen GP, Chen YB.** A novel computer-assisted drill guidetemplate for lumbar pedicle screw placement: a cadaveric and clinical study. *International Journal* 2009(January):184-91.
6. **Model SW.** Computer-assisted Navigation in bone tumour surgery seamless workflow model and evolution of technique. *Clin Orthop Relat Res* 2010.
7. **Muscolo DL, Ayerza MA, Farfalli G, Aponte-Tinao LA.** Proximal tibia osteoarticular allografts in tumor limb salvage surgery. *Clin Orthop Relat Res* 2010 May;468(5):1396-404.
8. **Robiony M, Salvo I, Costa F, et al.** Accuracy of virtual reality and stereolithographic models in maxillo-facial surgical planning. *J Craniofacial Surg* 2008;19(2):482-9.
9. **Roos PJ, Neu CP, Hull ML, et al.** A new tibial coordinate system improves the precision of anteriorposterior knee laxity measurements: a cadaveric study using Roentgen stereophotogrammetric analysis. *J Orthop Res* 2005;23:327-33.
10. **Sodian R, Weber S, Markert M, Loeff M, Lueth T, Weis F, Daebritz S, Malec E, Schmitz C, Reichart.** Pediatric cardiac transplantation: Three dimensional printing of anatomic models for surgical planning of heart transplantation in patients with univentricular heart. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2008;1-3.
11. **Van de Waterbeemd H, Gifford E.** ADMET in silico modelling: towards prediction paradise? *Nature Rev Drug Discov* 2003 Mar;2(3):192-204.
12. **Wong KC, Kumta SM, Antonio GE, Tse LF.** Image fusion for computer-assisted bone tumor surgery. *Clin Orthop Relat Res* 2008;466(10):2533-41.
13. **Wong KC, Kumta SM, Chiu KH, et al.** Oncology Precision tumour resection and reconstruction using image-guided computer navigation. *J Bone Joint Surg (Br)* 2007;89(7):943-7.