

Universidad Nacional de Córdoba - Facultad de Ciencias Médicas
Carrera de Ingeniería Biomédica

Proyecto integrador
Biblioteca Digital 3D de Huesos Humanos
<http://3danato.cim.unc.edu.ar/>



Alumno:

Nino Antonio Nobile
Matricula: 34700017

Director:

Prof. Dr. Gustavo Juri

Co-Director:

Prof. Dr. Esteban Jauregui



Ingeniería
Biomédica

Córdoba, Noviembre 2016

Agradecimientos

Agradezco en este espacio a las personas que me acompañaron durante mi carrera, especialmente a mis padres que me educaron y apoyaron tanto moral como económicamente aunque me equivocara. Simplemente es imposible describir la ayuda que recibí de ellos.

A mi novia y a mi hermana que me aguantan.

A todos mis amigos que aunque no los vea sé que siempre están.

A las personas que conocí y me ayudaron mientras realizaba este trabajo.

Resumen

La construcción de modelos tridimensionales de componentes anatómicos con datos obtenidos a partir de diversas fuentes como estudios de CT / MR, ultrasonido y relevamiento laser, ha resultado de gran interés académico. Además estos modelos son factibles de ser fabricados a bajo costo mediante técnicas de prototipado rápido y han demostrado ser de gran utilidad en diversas áreas científicas para el estudio, preservación, investigación e incluso la aplicación de tratamiento médico.

En la actualidad, con los grandes avances en el campo de adquisición de información tridimensional, es cada vez más factible recrear mediante datos informáticos una representación fiel de un objeto real.

En el presente trabajo se desarrollan todas las etapas para la construcción de un modelo tridimensional aplicadas a todos los huesos componentes del esqueleto humano pertenecientes a la Catedra de anatomía de la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Se desarrolla también la técnica de escaneo empleada para relevar los datos empleando un equipo de triangulación por láser existente en el Laboratorio de Diseño Integrado Biomédico de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC. En este documento se describen las nociones básicas sobre biomodelos y biomodelado y sus aplicaciones también se detallan los pasos realizados para obtener los modelos digitales de las piezas óseas escaneadas y finalmente son mostrados y discutidos los resultados obtenidos con la metodología planteada.

Abstract

The construction of three-dimensional models of anatomical components with data obtained from various sources such as CT / MR, ultrasound and laser surveying has been of great academic interest. In addition, these models are feasible to be manufactured at low cost by means of rapid prototyping techniques and have proved to be very useful in various scientific areas for the study, preservation, investigation and even the application of medical treatment.

At present, with the great advances in the field of acquisition of three-dimensional information, it is increasingly feasible to recreate by computer data a faithful representation of a real object. In the present work all stages are developed for the construction of a three-dimensional model applied to all bones of the human skeleton belonging to the Anatomy Chair of the Faculty of Medical Sciences of the National University of Córdoba (UNC).

Also developed is the scanning technique used to relay the data using a laser triangulation equipment located in the Laboratory of Integrated Biomedical Design of the Faculty of Exact, Physical and Natural Sciences of the UNC.

This paper describes the basic notions about biomodels and biomodels and their applications also details the steps taken to obtain the digital models of the scanned bone pieces and finally show and discuss the results obtained with the methodology proposed.

Índice:

Agradecimientos.....	2
Resumen.....	3
Abstract.....	4
Índice:.....	5
Introducción.....	7
Objetivos.....	8
Objetivos generales.....	8
Objetivos específicos.....	8
Capítulo 1: biomodelado y biomodelos.....	9
Aplicaciones de los biomodelos.....	9
Cirugía cráneo-maxilofacial.....	10
Uso de biomodelos en la creación de prótesis personalizadas.....	10
Biomodelos como guía para cirugía estereotáctica.....	10
Biomodelado vascular.....	11
Cirugía de tumores de la base del cráneo.....	11
Cirugía de columna.....	12
Ortopedia.....	12
Biomodelos a partir de escaneo 3D.....	12
Capítulo 2: Nociones Básicas Sobre el Hardware Utilizado.....	15
Introducción.....	15
Hardware.....	15
Clasificación básica según la tecnología o el principio de funcionamiento.....	15
Breve descripción de los tipos de hardware.....	15
FastSCAN.....	16
Capítulo 3: descripción del método de escaneo.....	20
Preparación de la pieza.....	20
Preparación del entorno de escaneo.....	20
Escaneo propiamente dicho.....	20
Para realizar cada uno de los barridos.....	21
Técnicas de escaneo.....	21
Posible capítulo 4: Marco Teórico Sobre la Construcción de Modelos Digitales.....	23
Proceso de construcción de modelos digitales.....	23
Registro.....	23
Alineado de dos vistas.....	24

Line-of-sight Error compensation.....	25
Integración de los barridos.....	26
Métodos basados en la triangulación de Delaunay.....	27
Métodos basados en la superficie.....	27
Métodos volumétricos.....	27
Método de superficies deformables.....	27
Postprocesamiento.....	28
Capítulo 5: Descripción del Proceso De Construcción en el Software Geomagic.....	29
Capítulo 6: Nociones básicas sobre prototipado rápido.....	42
Estereolitografía y otros sistemas de tipo resina.....	42
Modelado por deposición fundida y sinterizado laser selectivo.....	43
Modelado por inyección de tintas.....	44
Desventajas del prototipado rápido.....	44
Capítulo 7: Diseño Del Sitio Web.....	45
Capítulo 8: Resultados Y Conclusiones.....	46
Bibliografía y referencias:.....	48
Anexos.....	50
Anexo 1: imágenes de los resultados obtenidos para distintas reconstrucciones.....	51
Anexo 2: navegación en capas.....	52
Anexo 3: tabla de modelos construidos.....	53

Introducción

La digitalización tridimensional es la generación de un modelo informático tridimensional de un objeto. El modelo digital puede procesarse en un sistema informático no solamente para generar imágenes, sino también para realizar cálculos, estudiar sus propiedades conformacionales y estructurales, editarlo o imprimirlo.

Independientemente de la tecnología usada, la digitalización implica una toma de datos del objeto y un procesamiento informático de los mismos.

En las últimas décadas ha sido el desarrollo de los escáneres láser lo que ha hecho posible capturar de forma rápida un conjunto de muestras suficientemente grande de los objetos.

Con un escáner es posible obtener una distribución de puntos representativos de la superficie del objeto, y en algunos casos información de color en los puntos. Para algunas aplicaciones es suficiente este conjunto de puntos como representación del objeto, haciendo la visualización directa de los puntos. Sin embargo, para obtener un modelo 3D útil es necesario procesar esta nube de puntos para generar una malla poligonal. Por otra parte, la digitalización de cualquier objeto, por simple que sea, conlleva la realización de varias tomas con el escáner, que dan lugar a varias nubes de puntos, que se deben fusionar en una única malla. Además, el número de puntos suele ser excesivamente alto, debido a que el muestreo es fijo, e independiente de las irregularidades del objeto. Cada una de estos pasos se resuelve con procesos semiautomáticos, con un consumo alto de tiempo y recursos de cálculo.

Además de los escáneres laser, la impresión 3D es una de las grandes tendencias en los últimos años, esta tecnología juega un papel importante tanto para la educación mediante la elaboración de recursos didácticos, como para el desarrollo de productos, el tratamiento médico e incluso la investigación. Para realizar una impresión 3D es un requisito indispensable contar con un modelo de aquello que se desea imprimir y es aquí donde una base de datos de modelos digitales adquiere gran importancia.

La digitalización de elementos óseos permite conservar los elementos originales, evitando que estos deban ser reemplazados al cabo de un tiempo determinado. Al mismo tiempo que permite la interacción directa con la información contenida en el objeto. Por otra parte, permite el acceso a la información de forma simultánea, a través de la creación de modelos de alta fidelidad a los que pueden acceder estudiantes, docentes, profesionales e investigadores de todo el mundo.

Por otro lado la anatomía como ciencia de las formas y de las estructuras del cuerpo humano y como una de las disciplinas más importantes tanto en medicina como en ingeniería biomédica, solo es factible de aprendizaje además de leyéndolo, mirándolo, y es aquí donde estas tecnologías tienen gran impacto al generar modelos tridimensionales de la realidad, visibles o palpables que representan una herramienta más respecto a los figuras, dibujos o gráficos que acompañan normalmente las descripciones anatómicas.

Teniendo en cuenta las ventajas, utilidades e importancia de lo antes mencionado, junto con el hecho de lo escaso y difícil que puede llegar a ser disponer de este tipo de material creemos que es indispensable contar con

una base de datos que recopile la mayor cantidad y variedad de modelos posible y que esta esté disponible de forma masiva y universal.
De allí se desprenden los objetivos del proyecto que describiremos a continuación.

Objetivos

Objetivos generales

(Pequeño comienzo de un gran trabajo)

Crear un sitio web con una base de datos de huesos humanos.

Además se pretende dar comienzo a un trabajo mucho mayor, incluyendo el resto de los órganos y sistemas, sentando las bases y precedentes para la incorporación de las distintas estructuras normales y patológicas de la anatomía humana.

Objetivos específicos

Para la ejecución del presente proyecto integrador se establecieron los siguientes objetivos puntuales relacionados con el primer objetivo general:

1. Mediante escaneo 3D realizar un relevamiento de todos los huesos componentes del sistema óseo humano (número exacto de huesos), utilizando para ello un escáner laser.
2. Construir un modelo tridimensional por cada uno de los huesos escaneados.
3. Exportar cada modelo tridimensional en dos formatos, PDF y STL, el formato PDF es el más adecuado para la visualización del modelo, mientras que el STL es el formato estándar para realizar una construcción física del modelo mediante una máquina de Prototipado Rápido (RP).
4. Subir cada modelo a una base de datos desde donde pueda accederse a ellos a través de la web.
5. Implementación de un sitio web simple e intuitivo para acceder a la base de datos de huesos.

1.

Capítulo 1: biomodelado y biomodelos

El *biomodelado* es un término que describe la capacidad de replicar la morfología de una estructura biológica dada en un objeto sólido. Más técnicamente podría definirse como el proceso de usar energía radiante para capturar datos morfológicos sobre una estructura biológica y el procesamiento de tales datos por una computadora para generar el código requerido para fabricar la estructura empleando una máquina de prototipado rápido (RP). Y un biomodelo es el resultado de este proceso.

La "virtualidad real" es el término acuñado para describir la creación de la realidad sólida a partir de modelos virtuales. En medicina, el biomodelado se ha utilizado para crear la virtualidad real anatómica.

Debido a los diferentes requisitos para el escaneo médico y el industrial, no todas las técnicas de digitalización 3D pueden usarse para la obtención de modelos de aplicación médica.

Muchas tecnologías de exploración médica pueden ayudar a recopilar o capturar los datos de la geometría inicial. Entre ellas la tomografía computada (CT) y la resonancia magnética (MR) son muy populares y la forma en la que en ellas se presentan los datos (capa por capa) es similar a la forma en la que se lamina un modelo 3D para ser fabricado.

La precisión de la tecnología RP está impulsando el refinamiento de los algoritmos para identificar superficies y características de los datos CT / MR. Las inexactitudes en los modelos fabricados por RP están relacionados con la limitada resolución de los estudios de CT / RM y con las limitaciones respecto a los actuales algoritmos en la interpretación de datos.

La tecnología de escaneo 3D proporciona resultados rápidos y con alta resolución, con base en esta ventaja, la ingeniería inversa y RP pueden ser integrados en aplicaciones médicas. Y por último los datos capturados a través de estudios de ultrasonido son las tecnologías más comúnmente usadas.

Aplicaciones de los biomodelos

La realización física a partir de los datos obtenidos a través de estudios de CT / MR, ultrasonido y escaneo laser ha tenido un impacto significativo en varias áreas.

1. Comunicación: médico - paciente mejorando el consentimiento informado; medico - medico.
2. Visualización: diagnostico, planificación de tratamiento.
3. Simulación: optimización y planificación de cirugías, cirugía estereotáctica.
4. Prótesis: creación de prótesis personalizadas, colocación exacta de implantes, placas, etc.

El modelo físico simplifica la comunicación: tanto médico-paciente como médico-médico. Los modelos son útiles para el diagnóstico y la planificación del tratamiento, particularmente para procedimientos quirúrgicos complejos. La precisión y las propiedades materiales del modelo proporcionan la base para la simulación y la evaluación de escenarios

alternativos, de modo que la optimización se puede hacer antes de la cirugía real. Los modelos precisos pueden ser usados como guía y como retroalimentación en la ejecución de cirugías estereotacticas. Además, los modelos se pueden utilizar para desarrollar prótesis precisas y ayudas quirúrgicas por adelantado.

De forma más específica, describiremos brevemente las aplicaciones puntuales de los biomodelos

Cirugía cráneo-maxilofacial

La complejidad cráneo-maxilofacial combinada con la variación morfológica encontrada hace de la cirugía cráneo-maxilofacial una tarea conceptualmente difícil de explicar, planificar, ejecutar.

En la cirugía cráneo-maxilofacial, los biomodelos han sido tradicionalmente utilizados por los cirujanos para obtener información sobre casos inusuales o particularmente complejos.

Como este procedimiento implica un equipo multidisciplinario, los biomodelos son usados a menudo para mejorar la comunicación entre los miembros del equipo.

Una técnica desarrollada para implementar este tipo de cirugía utiliza dos biomodelos, el primer biomodelo es reconstruido por el cirujano y actúa como el estado final al que se quiere llegar. Mientras que el segundo biomodelo el cirujano marca las líneas de osteotomía que pretende utilizar.

Uso de biomodelos en la creación de prótesis personalizadas

Las técnicas tempranas de biomodelado usaban procesos de fresado para crear modelos que podían ser fabricados en un molde a partir del cual el implante podía ser modelado.

Modelo fresado -> molde -> modelo del implante.

Un modelo también podría actuar como una plantilla. La cera podría ser moldeada para crear un implante maestro que podría utilizarse para crear un molde a partir del cual el implante podría ser fundido.

Molde fresado plantilla -> molde de cera -> implante fabricado por fundición.

En cirugía los nuevos métodos de biomodelado permiten generar un modelo del implante de la parte faltante a partir de la parte sana mediante procesamiento gráfico. Este modelo puede ser fabricado mediante RP y terminado a mano para encajar perfectamente al biomodelo de la parte sana, el cual tiene un alto grado de precisión.

Luego el biomodelo del implante puede utilizarse para crear un molde a partir del cual se moldea un implante acrílico

Fabricación mediante RP de la parte sana y de la faltante -> Molde -> fabrica un implante en acrílico.

El uso de prototipos rápidos para fabricar componentes protésicos tanto de la parte faltante como de la parte sana simultáneamente tiene ventajas significativas sobre las técnicas anteriores:

- Proporciona directamente un implante a partir del cual se puede hacer un molde
- No es necesario crear un molde de cera del implante del molde final.
- Se puede utilizar con todos los materiales protésicos conocidos.

Biomodelos como guía para cirugía estereotáctica

La cirugía estereotáctica puede definirse como la capacidad para localizar con precisión estructuras cerebrales después de localizar estructuras

discretas por medio de un aparato estereotaxico¹ con un sistema de coordenadas tridimensionales.

La estereotaxia guiada por biomodelos utiliza un *phantom* como fuente de las coordenadas tridimensionales para la localización precisa de la anatomía intracraneal.

El método se describe a continuación:

1. El paciente se somete a un estudio CT y se fabrica el biomodelo.
2. El aparato es fijado a puntos definibles en el biomodelo.
3. El aparato estereotaxico se utiliza para crear un plan operativo para que las coordenadas de intervención puedan ser guardadas (por ejemplo, se define una trayectoria para localizar un objetivo).
4. El aparato se transfiere al paciente a través de puntos comunes definibles.
5. La intervención se repite en el paciente utilizando las coordenadas guardadas.

Esta nueva técnica de cirugía estereotáxica sobre los métodos actuales utilizados:

1. La metodología es mecánica y simple, basada en el ensayo del procedimiento en un *phantom* preciso, reduce el grado de error del sistema y del cirujano.
2. No requiere computadora para implementar en el quirófano.
3. Se requiere poco entrenamiento, ya que las habilidades quirúrgicas requeridas son las de cirugía estándar.
4. El paciente puede realizarse el estudio de CT sin el marco fijado varios días antes.
5. Los biomodelos pueden utilizarse de manera realista e interactiva para simular la cirugía, es decir, la trayectoria estereotáctica. Esto permite al cirujano planificar modificaciones a las técnicas estándar.
6. Los biomodelos proporcionan a los pacientes una comprensión más clara de su patología y los objetivos y limitaciones de la cirugía preoperatoria, mejorando el consentimiento informado.
7. Los biomodelos no requieren ningún equipo o conocimiento especializado para su interpretación y uso, son resistentes y pueden ser fácilmente transportados y esterilizados para uso intraoperatorio.

Biomodelado vascular

Se ha descubierto que los biomodelos cerebrovasculares son muy útiles en para la evaluación preoperatoria y la referencia intraoperatoria.

Las aplicaciones quirúrgicas que se han identificado incluyen cirugía para aneurismas intracraneales y corrección de malformaciones arteriovenosas. En dichas aplicaciones los biomodelos representan con exactitud la vasculatura. En estos casos los biomodelos pueden dar una mejor visión de la anatomía en comparación con imágenes estándar 2D y 3D, ya que la anatomía es compleja y difícil de interpretar a partir de múltiples proyecciones 2D. Los biomodelos permiten anticiparse a los problemas y

¹ Es un instrumento que permite al médico situar un objeto como un electrodo o una cánula en un lugar específico del cerebro generalmente. El dispositivo incluye un soporte para la cabeza, un soporte para el electrodo, y un mecanismo calibrado que permite desplazar este soporte en los tres ejes espaciales a lo largo de unas distancias calculadas: anterior-posterior, dorsal-ventral, y lateral-medial.

ayudan en la selección de clips de aneurisma adecuados. Además son una valiosa herramienta para obtener el consentimiento de pacientes y de familiares, ya que la cirugía cerebrovascular tiene un alto índice de morbilidad y mortalidad.

Otra aplicación interesante en el biomodelado vascular es el biomodelado del corazón y sus válvulas. La replicación de las válvulas cardíacas anormales puede ayudar en el estudio de los efectos sobre la hemodinámica.

Cirugía de tumores de la base del cráneo

Los tumores que aparecen en la base del cráneo ocupan el lugar más inaccesible y anatómicamente complejo de cuerpo. La resección de estos tumores es inmensamente difícil para el cirujano y de alto riesgo para el paciente. Para maximizar el éxito terapéutico, las estrategias adoptadas deben adaptarse a cada paciente y deben planificarse cuidadosamente utilizando toda la información anatómica posible.

El biomodelado de los tumores de la base del cráneo es un desafío porque dos o tres diferentes tipos de tejidos deben incorporarse en el biomodelo. Se presenta un problema adicional a la hora del biomodelado al intentar separar con precisión el tejido del tumor del tejido blando circundante. Afortunadamente, los tumores tienden a ser más vasculares que los tejidos normales circundantes, y pueden emplearse agentes de contraste para resaltar los datos de la imagen. Esto mejora los valores de umbral de voxels tumorales y se puede utilizar para ayudar a editar el tumor por segmentación.

Cirugía de columna

En las deformidades espinales más complejas la colocación de tornillos pediculares e instrumentación es necesaria para mejorar la deformidad y asegurar la fusión ósea. En estos pacientes es particularmente útil la biomodelación espinal.

Un método para ayudar a la colocación de instrumentación empleando biomodelos desarrollada por D'Urso se describe a continuación:

1. Se fabrica el biomodelo a partir de datos de CT.
2. De forma preoperatoria se perfora la trayectoria de los tornillos en el biomodelo en los lugares deseados.
3. Se colocan pasadores metálicos en las perforaciones para visualizar la trayectoria así también como para medir el largo de tornillo requerido.
4. Se utiliza cemento acrílico para moldear el contorno de los pasadores.
5. El biomodelo y molde se esterilizan y se utilizan de forma intraoperatoria para replicar las trayectorias planeadas en la columna del paciente.

Los biomodelos son particularmente útiles para procedimientos espinales mínimamente invasivos. En tales casos la cirugía se realiza a través de una pequeña incisión. Esta técnica limita la anatomía visible y puede dificultar la orientación y la navegación.

El cirujano compensa esto usando radiografía intraoperatoria. Se ha descubierto que el uso de biomodelos en procedimientos mínimamente invasivos aumenta la confianza y la precisión de la colocación de los tornillos mientras se reduce el uso de rayos X.

Ortopedia

La mayoría de los procedimientos ortopédicos se planifica sobre la base de la radiografía únicamente. Por lo que se presentan algunos inconvenientes a la hora de plantear la idea de realizar un estudio de CT solamente para la fabricación de un biomodelo. Además los biomodelos suelen ser mucho más grandes que el volumen de fabricación de las máquinas de RP por lo que se tiene que cortar y luego ensamblarse, lo que junto con el tamaño de los huesos (cadera por ejemplo) los hace más costosos.

Por lo que si el biomodelo se está creando únicamente por razones de diagnóstico, la reducción del tamaño no influye en gran medida en su utilidad, por lo que es recomendable escalar el modelo al 50 - 100% de su tamaño.

Biomodelos a partir de escaneo 3D

Las principales ventajas de la tecnología de escaneo laser en aplicaciones médicas están relacionadas a que el proceso es sin contacto, rápido y resulta en una nube de puntos referenciada a un sistema de coordenadas en donde cada punto se encuentra directamente sobre la superficie del objeto escaneado. Además la alta resolución y el haz más delgado del láser permiten escanear objetos altamente detallados. Esto permite medir partes frágiles y hace que esta tecnología sea especialmente útil para aplicaciones dentales o protésicas.

En la mayoría de los casos, la obtención de un modelo 3D de un objeto a partir del escaneo 3D (Ingeniería Inversa o RE por sus siglas en inglés) es una instancia previa al modelado y prototipado rápido (PR).

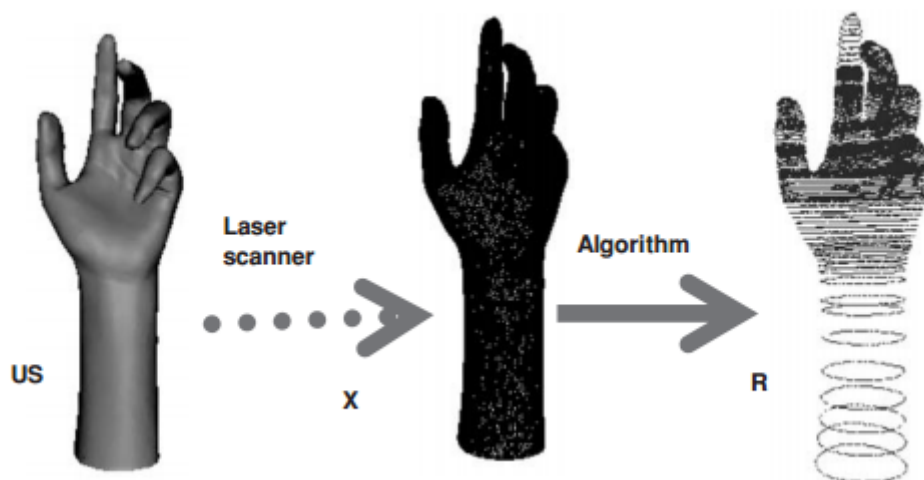


Ilustración 1 Flujo de trabajo de la RE y RP en aplicaciones médicas.²

Donde dada una nube de puntos X obtenida a partir de una superficie desconocida US se construye un modelo R que se aproxima a US en el sentido de controlar el error de forma.

Método propuesto para la construcción de modelos de RP a partir de datos escaneados

En general el modelado de una nube de puntos para RP se realiza siguiendo alguno de los siguientes tres enfoques, en el primero se reconstruye el modelo de superficie como un sólido cerrado. Entonces este sólido formado por una malla de triángulos puede ser editado o puede ser convertido a un formato apto para el RP como el formato STL, luego el STL puede ser laminado. En el segundo enfoque se crea un archivo STL directamente de la nube de puntos, luego el STL puede ser laminado. Por último el tercer enfoque va directamente de una nube de puntos al archivo laminado.

Como dijimos anteriormente el primer enfoque tiene la ventaja de que puede ser editado. El error de forma del modelo final para RP respecto de la nube de puntos obtenida por el escáner proviene de tres fuentes:

1. El error de forma entre la nube de puntos y el modelo sólido.
2. El error de forma entre el modelo sólido y el modelo STL.
3. El error de forma entre el STL y el modelo laminado.

Esto hace que el error de forma del modelo RP sea muy difícil de controlar. Si tenemos en cuenta el segundo enfoque, el error de forma proviene de dos fuentes:

1. El error de forma entre la nube de puntos y el modelo sólido.
2. El error de forma entre el STL y el modelo laminado.

El error de forma final para el segundo enfoque mejora respecto al primero pero aun no es sencillo. En el tercer enfoque el modelo laminado es realizado a partir de la nube de puntos directamente, entonces solo hay una fuente de error. Si este error puede ser controlado, el tercer enfoque tiene una clara ventaja sobre los otros dos enfoques en términos de error de forma.

Los modelos son laminados utilizando una técnica de laminado denominada *laminado adaptativo o adaptive slicing*, en la que se adapta la altura de capa en función del contorno del modelo.

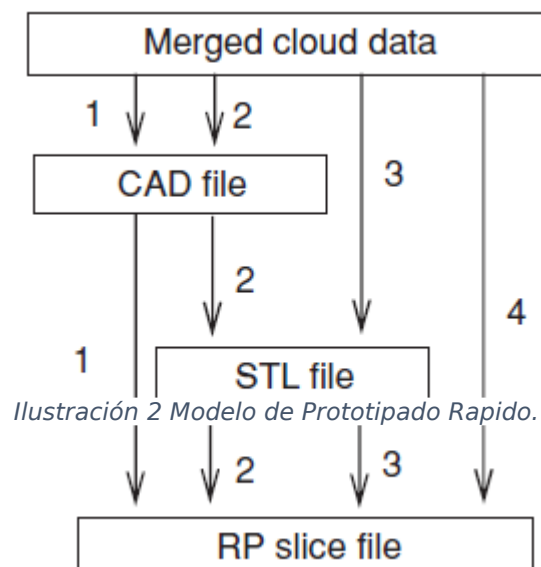


Ilustración 2 Modelo de Prototipado Rapido.

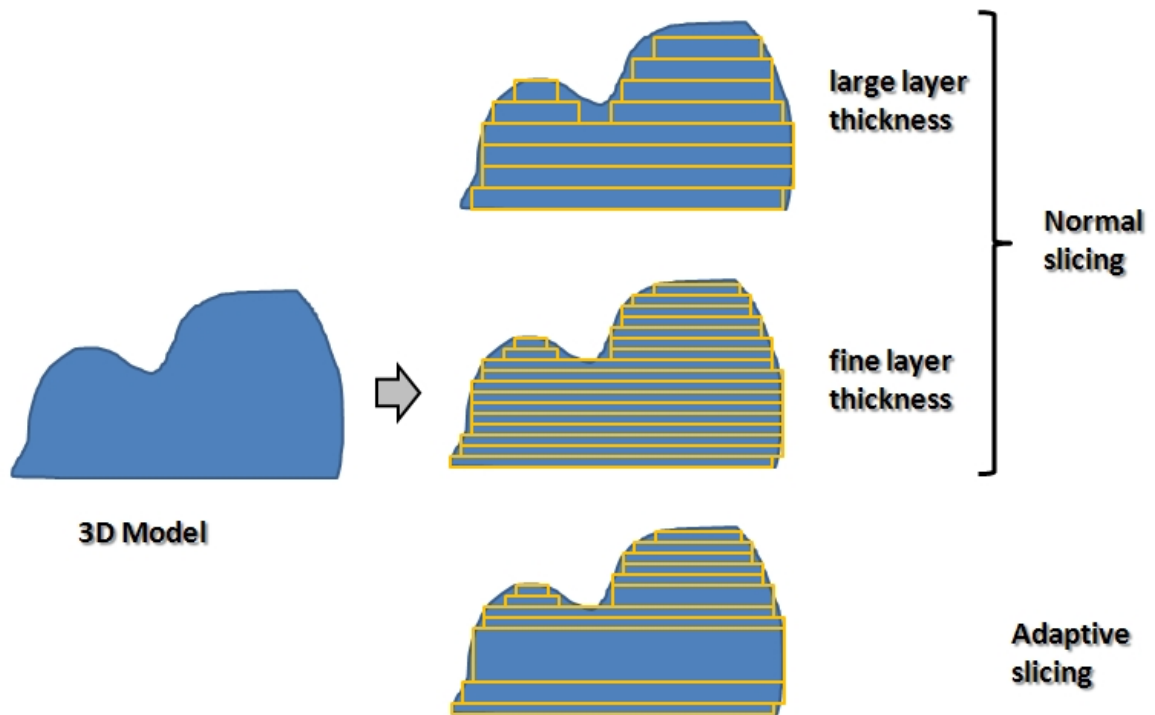


Ilustración 3 laminado adaptativo o adaptive slicing³

³ Imagen obtenida de <http://www.meccanismocomplesso.org/en/rapid-prototyping/>.
Última visita a la página 20/10/2016.

Capítulo 2: Nociones Básicas Sobre el Hardware Utilizado

Introducción

El objetivo de un escáner 3D es la adquisición de un modelo informático que luego puede ser procesado a través de software orientado a las aplicaciones gráficas. Por un modelo 3D nos referimos a una descripción numérica del objeto que puede ser usada para crear imágenes del objeto desde diversos puntos de vista y bajo diversas condiciones de iluminación. Además, la geometría del objeto debe ser editable.

Hardware

Clasificación básica según la tecnología o el principio de funcionamiento

1. Por contacto
2. Sin contacto activos
 - a. Tiempo de vuelo
 - b. Triangulación
 - c. Diferencia de fase
 - d. Holografía conoscópica
 - e. Luz estructurada
 - f. Luz modulada
3. Sin contacto pasivos
 - a. Estereoscópicos
 - b. Silueta
 - c. Modelado basado en imágenes

Breve descripción de los tipos de hardware

Por contacto

Este tipo de escáner requiere del contacto directo con la superficie, una serie de sensores internos permite determinar la posición del palpador. Estos escáneres son muy precisos, con precisiones típicas de 0,01mm y presentan como principal desventaja que pueden modificar o dañar las piezas al escanearlas además requiere tiempos de escaneo muy extensos.

Sin contacto

- Triangulación

El escáner de triangulación es también un escáner activo que utiliza luz láser para examinar el entorno. El equipo cuenta con una fuente emisora de luz láser y una cámara como sensor. Dependiendo de la distancia a la que el láser golpee una superficie, el punto del láser aparece en lugares diferentes en el sensor de la cámara.

- Tiempo de vuelo

Los escáneres 3D de tiempo de vuelo calculan la distancia de los puntos midiendo el tiempo en que tarda en regresar un haz de luz emitido por un diodo.

- Diferencia de fase

Este tercer tipo de escáner mide la diferencia de fase entre la luz emitida y la recibida, y utiliza dicha medida para estimar la distancia al objeto. El haz láser emitido por este tipo de escáner es continuo y de potencia modulada.

- Holografía conoscópica

En estos escáneres un haz reflejado en una superficie atraviesa un cristal birrefringente, esto es, un cristal que posee dos índices de refracción, uno ordinario y fijo y otro extraordinario que es función del ángulo de incidencia del rayo en la superficie del cristal.

Como resultado de atravesar el cristal obtienen dos rayos paralelos que se hacen interferir utilizando para ello una lente cilíndrica, esta interferencia es capturada por el sensor de una cámara convencional obteniendo un patrón de franjas. La frecuencia de esta interferencia determina la distancia del objeto en el que se proyectó el haz.

- Luz estructurada

El escáner 3D consta de una fuente de luz y una cámara separados entre sí. Para escanear el objeto se define un [sistema de coordenadas esféricas](#) para determinar cada punto del espacio tridimensional que se está capturando. Los escáneres 3D de luz estructurada proyectan un patrón de luz en el objeto y analizan la deformación del patrón producida por la geometría de la escena.

- Luz modulada

Los escáneres 3D de luz modulada emiten una luz continuamente cambiante en el objeto. Generalmente la fuente de luz simplemente cicla su amplitud en un patrón sinodal. Una cámara detecta la luz reflejada y la cantidad que el patrón de luz cambia para determinar la distancia viajada por la luz.

Pasivos

Este tipo de escáner no emite radiación por si mismo sino que se limita a captar la radiación reflejada por el ambiente.

- Estereoscópicos

Los sistemas estereoscópicos utilizan el mismo principio de la fotogrametría, utilizando la medida de la paralaje entre dos imágenes para determinar la distancia de cada pixel de la imagen. Emplean generalmente dos cámaras de video, levemente separadas.

- Silueta

Estos tipos de escáneres 3D usan bosquejos creados de una sucesión de fotografías alrededor de un objeto tridimensional contra un fondo muy bien contrastado.

Con ayuda del usuario

Este método basado en la ayuda del usuario para el descubrimiento e identificación de algunas características y formas en un conjunto de retratos diferentes de un objeto son capaces de construir una aproximación del objeto mismo.

FastSCAN

El equipo utilizado es un escáner 3D de la empresa Polhemus, es un escáner activo, sin contacto que opera por triangulación.

En este punto es importante destacar que el escáner puede verse como una caja negra que produce una nube de puntos, pero conocer los principios de funcionamiento podría permitir adquirir modelos más precisos y eficientes.

Componentes del equipo



Ilustración 4: FastScan

- Dispositivo de barrido y relevamiento (DBR) (1).
- Unidad de procesamiento (PU) (2).
- Transmisor (3).
- Receptor de referencia (4).
- Cable del dispositivo de barrido y relevamiento (5).

El dispositivo de barrido y relevamiento es el componente activo del escáner, contiene la fuente de luz láser y la cámara CCD, y brinda el soporte estructural para el traslado de dichos componentes.

El transmisor emite un campo electromagnético variable, que es usado por el sistema de seguimiento para determinar la posición y orientación del DBR y en el caso que corresponda del Receptor de referencia.

El receptor de referencia se utiliza cuando el objeto escaneado no sea capaz de permanecer estacionario o cuando sea demasiado grande.

Principio básico de funcionamiento

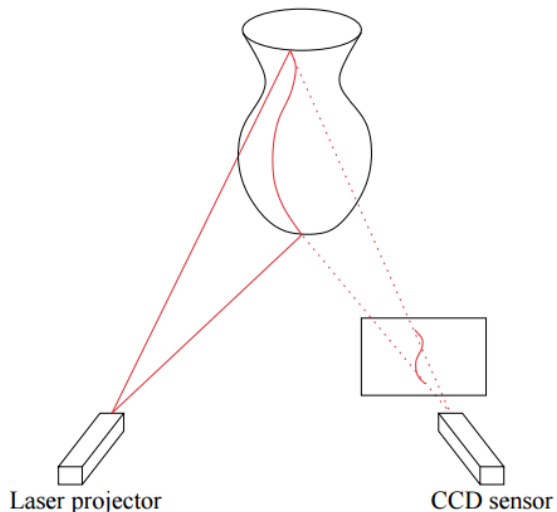
El equipo cuentan con un sistema de iluminación que proyecta un patrón de luz sobre el objeto a escanear, en este caso un haz laser, y un sensor, una cámara CCD que censa el reflejo del haz de luz sobre el objeto.

Si imaginamos un triángulo cuyos vértices corresponden al sistema de iluminación, la cámara CCD y el punto en la superficie del objeto, entonces se conoce un lado que está definido por la longitud entre la fuente y el sensor, el ángulo del vértice del emisor (por razones constructivas) y determinando cual es el detector que se activó se conoce el ángulo del vértice del sensor. Empleando estos datos el software proporcionado por el fabricante determina un arreglo de puntos de profundidad el cual puede ser

convertido en la posición de los puntos del modelo 3D en el sistema de coordenadas interno del equipo.

Además el equipo posee un sistema de seguimiento electromagnético que ofrece 6 grados de libertad y permite conocer la posición y orientación del DBR en tiempo real (4ms de latencia).

Las limitaciones de los sistemas de escaneo por triangulación están relacionadas con el objeto, de modo que la superficie del objeto debe permitir una “vista libre” para ambas partes, emisor y receptor. Las propiedades reflectivas de la superficie afectan la calidad de los datos y el rendimiento de los equipos por triangulación suele ser pobre si las superficies son demasiado brillantes, en superficies de bajo albedo o en con mucha dispersión.



Características principales

FastScan

- Resolución

La resolución a lo largo del haz laser depende de la distancia entre la varita y el objeto, a 200mm de distancia es de 0,5mm. Con un máximo de resolución de 0,1mm.

Rango de escaneo

El rango de escaneo está definido por una esfera centrada en el transmisor y de radio 75cm.

- Exactitud

La exactitud practica se determinó escaneando una bola de bowling y calculando el radio en la superficie de la nube de puntos.

- Ambiente

Grandes equipos o piezas metálicas o con componentes electromagnéticos pueden interferir en el sistema de seguimiento del escáner. Las fuentes de luz artificial demasiado brillante o el sol pueden ocasionalmente ser vistas por la cámara añadiendo ruido a los datos.

Algunas superficies pueden no ser aptas para ser escaneadas por ejemplo, las superficies demasiado reflectivas, translucidas, transparentes, oscuras o complicadas y profundas.

FasTrak

- Latencia : 4ms

- Tasa de actualización de datos: 120/s
- Exactitud estática

0,03*25,4 mm RMS para la posición en los ejes x, y o z; 0,15° RMS para la orientación.

- Resolución

0,0002 pulgadas por pulgada de separación entre el transmisor y el sensor electromagnético; 0,025° para la orientación.

Capítulo 3: descripción del método de escaneo

Preparación de la pieza

La superficie de la pieza a escanear debe ser de un color claro y poco reflectiva. Si la pieza no cumple con estas condiciones se deberá hacer algún tratamiento superficial para que la misma sea apta para el escaneo. El tratamiento puede consistir en recubrir la superficie con:

- Arcilla.
- Talco.
- Acrílico.
- Tempera.
- Spray blanco para cabello.
- Revelador de tintas penetrantes (pintura en aerosol que deposita una película de polvo fino de color blanco usada para ensayos no destructivos).
- Cualquier tipo de tratamiento que cubra la pieza con una película lo más fina y uniforme posible, logrando un acabado mate de color claro.

Preparación del entorno de escaneo

- La pieza debe colocarse lo más próxima posible al transmisor y debe evitarse el movimiento relativo entre estos elementos.
- La base donde se apoya la pieza debe ser negra u oscura para que no aparezca en el escaneo. Esto no es un requisito para el escaneo, simplemente facilita el postprocesamiento de los datos (si el fondo o base es escaneado habrá que eliminarlo manualmente desde el software).
- Deben alejarse al menos 1 metro del entorno de escaneo las masas metálicas de tamaño considerable (PC, marcos de ventanas, etc).

Escaneo propiamente dicho

1. Conectar el láser.
2. Encender el escáner.
3. Abrir el programa (puede hacerse indistintamente antes o después de los puntos anteriores).
4. Esperar a la indicación de scanner on line. Es importante NO apretar el gatillo mientras esté la indicación de scanner initializing.
5. Apuntar con el láser al transmisor y hacer un disparo tipo 1 (primera posición del gatillo). En este momento aparecerá una indicación en la pantalla. Este paso es necesario sólo una vez cuando se inicia el programa; luego, por más que se inicie un nuevo escaneo (sin cerrar el programa) esto no es requerido.
6. Si se modifica el entorno de trabajo cerrar el programa y volver a abrirlo para realizar el punto anterior. De no cumplirse este paso pueden aparecer errores importantes en el escaneo.
7. Esperar unos minutos para que el equipo alcance la temperatura de trabajo; puede aprovecharse esto para realizar barridos de prueba que ayuden a la planificación del escaneo.
8. Setear la sensibilidad en 1.
9. Colocar el programa en "Camera Mode".
10. Presionar y mantener el gatillo en la posición 1 sobre la pieza y

verificar si en la pantalla aparece una línea continua; en caso de no ser así aumentar en 1 la sensibilidad hasta que se verifique esta condición.

Importante

Para escanear un objeto es necesario hacer un determinado número de barridos con la varita. Se debe mantener la varita a 10-15cm del objeto, una distancia menor a 8cm o mayor a 22cm provocara que los datos estén fuera del rango de la cámara.

El modelo tridimensional del objeto se obtiene por la superposición de los barridos realizados por lo que se requiere una acción suave y consistente para obtener los mejores resultados.

Para realizar cada uno de los barridos

1. Se debe presionar el gatillo hasta la posición 1 y asegúrese de que puede ver el perfil del láser o la línea de inicio de barrido en la pantalla de la pc, en caso de no ser así aumentar en 1 la sensibilidad hasta que se verifique esta condición.
2. Se debe presionar el gatillo hasta la posición 2
3. Mueva la varita sobre la superficie del objeto realizando un movimiento suave
4. Al finalizar el barrido suelte el gatillo.
5. Los datos de los sucesivos barridos irán apareciendo en la pantalla del ordenador. Esto permite identificar áreas que no hayan sido registradas o que requieran ser repasadas.

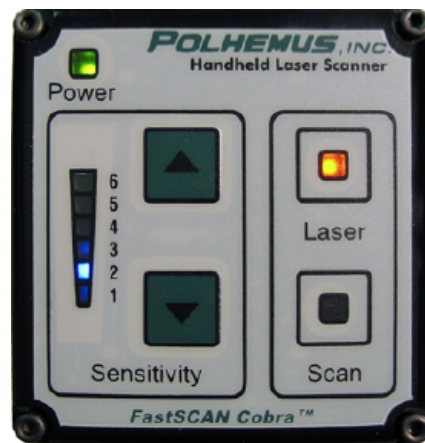


Ilustración 6: Control de Mano

6. Para obtener un mejor resultado:
7. Permita que la varita se caliente durante 5min antes de comenzar a escanear.
8. Minimice la distancia de la varita al objeto y de la referencia a la varita (no meno a 8cm ni mayor a 22cm).
9. Realizar los barridos de forma suave.
10. Usar las dos manos para mejorar la estabilidad.
11. Aleje todos los objetos metálicos a más de 1m del área de trabajo.
12. Los barridos deben superponerse ligeramente y las áreas que lo requieran pueden ser re escaneadas individualmente, esto puede interpretarse como que cada barrido es una pieza de un rompecabezas: si una pieza no posee ninguna característica distintiva es muy difícil posicionarla correctamente.
13. Procurar realizar la menor cantidad posible de barridos que cubra la superficie por completo.
14. Evite superponer barridos innecesarios para minimizar el tamaño del objeto.
15. La velocidad con la cual se mueve la varita sobre el objeto es el mayor determinante de la resolución de los barridos.

Técnicas de escaneo

- Para la ejecución de los barridos puede optarse por distintas técnicas. Algunas con las que se han realizado relevamientos exitosos son las siguientes:
 - Barridos lineales: realizar movimientos en línea recta. De este modo se minimizan los errores introducidos por la presencia de objetos metálicos en el entorno de escaneo.
 - Barridos angulares: realizar movimientos basculantes con el láser, tomando como punto de apoyo la base del mismo. De esta manera se minimiza el error debido al pulso del operario.
 - Barridos tipo “spray”: tanto para los movimientos lineales como los angulares puede optarse por, en vez de realizar un movimiento continuo en una dirección, realizar movimientos cortos oscilando entre avance y retroceso (pero con un movimiento resultante de avance gradual). De este modo se aumenta la cantidad de puntos relevados, y de esta manera se mejora la resolución del escaneo. Sin embargo es recomendable hacer algunos escaneos de prueba al utilizar esta técnica para detectar el punto óptimo de “sobrescaneo”, ya que si se aumentan excesivamente la cantidad de puntos el error global del escaneo (debido a ruido e imprecisiones) pueden terminar resultando en un escaneo de peor calidad que la que se hubiera logrado de otra manera.

Una vez finalizado el escaneo, se pueden exportar los datos en varios formatos estándar. Una vez exportados los datos no pueden ser cargados nuevamente al programa desde el archivo exportado. Solo pueden volver a cargarse los datos cuando son guardados.

Los formatos disponibles para exportar los datos son los siguientes:

- Polyworks Line Scan (.psl)
- 3D Studio (.3ds)
- Ascii (.txt)
- AutoCAD (.dxf)
- IGES—Initial Graphics Exchange Format (.igs)
- Inventor (.iv)
- Lightwave Object (.lwo)
- AAOP/OP3(.aop, .op3)
- Matlab (.mat)
- Stanford Polygon File Format (.ply)
- Stereo Lithography (.stl)
- Virtual Reality Modeling Language (.wrl)
- Visualization Toolkit (.vtk)
- Wavefront Object (.obj)

Los datos son guardados en el formato nativo del software y son exportados en formato obj.

Posible capítulo 4: Marco Teórico Sobre la Construcción de Modelos Digitales

Proceso de construcción de modelos digitales

En este capítulo se describe la línea de trabajo para obtener un modelo 3d usable a partir de los datos relevados en el escaneo. Recordaremos la definición de modelo 3d como una descripción numérica del objeto que puede ser usada para crear imágenes del objeto desde diversos puntos de vista y bajo diversas condiciones de iluminación. Además, la geometría del objeto debe ser editable.

El proceso de construcción de modelos se muestra en la figura 1, existen dos etapas de procesamiento que puede ser trabajadas en paralelo, una para la geometría y otra para las propiedades de la superficie, en el presente trabajo se trabajó con la geometría de los objetos escaneados por lo que tendremos en cuenta solo la primer columna del proceso. Se consideró que las propiedades de superficie (color y detalle fino) no son lo suficientemente significativas teniendo en cuenta que en este caso el color del hueso no brinda ningún tipo de información y que el detalle obtenido a través del escaneo y reconstrucción es suficientemente alto para la aplicación deseada. De igual manera se presenta la segunda etapa del proceso a modo informativo solamente.

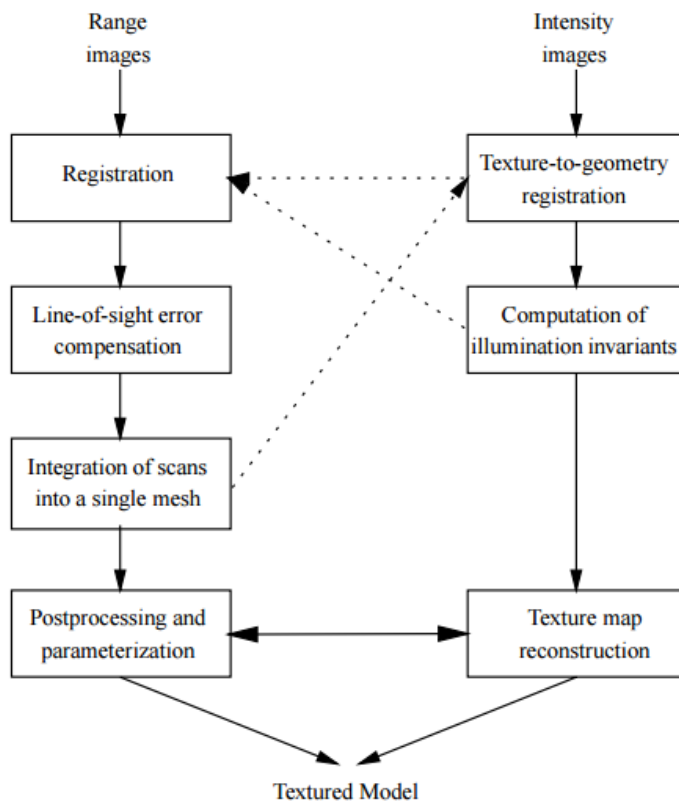


Ilustración 7: Proceso de construcción de modelos digitales

Registro

Incluso para el más simple objeto es necesario realizar varios barridos con el escáner para cubrir toda su superficie. Luego cada uno de los barridos debe ser alineado en un sistema de coordenadas común para así poder conformar un único modelo 3D del objeto.

Alineado de dos vistas

Generalmente el principio de funcionamiento y la técnica de seguimiento del escáner no coinciden en el mismo grado de exactitud. Por lo tanto, la alineación inicial debe ser refinada por una técnica diferente, el enfoque que ha demostrado ser más adecuado es el algoritmo de Iterative Closest Point (ICP).

El algoritmo de ICP consta de dos etapas: una etapa en la que se identifican pares de puntos candidatos en el área de superposición de dos barridos y luego se aplica una transformada que reduce la distancia entre los pares de puntos (en términos de distancia media cuadrática). Subsecuentemente se realizan iteraciones hasta que se satisface algún criterio de convergencia.

La idea general es que en cada iteración la distancia media entre los dos barridos disminuye, aumentando las posibilidades de seleccionar los dos puntos verdaderamente coincidentes y por lo tanto aumentando la posibilidad de mejorar la alineación en la siguiente iteración. Se ha demostrado que el proceso converge a un mínimo local y con una buena implementación, lo hace en pocos pasos. Por otro lado, puede o no converger a un mínimo global dependiendo de la configuración inicial, un ejemplo típico son dos barridos de una superficie cilíndrica, los puntos pueden coincidir en las coordenadas X e Y y estar desplazados en la coordenada Z.

Existen varios algoritmos que difieren en como son escogidos los pares de puntos, el tipo de transformada o el método de optimización. Por ejemplo pueden seleccionarse calculando la distancia Euclídeana⁴ entre los puntos o se puede buscar la intersección entre una recta normal a un punto dado en la primera superficie y la segunda superficie, y luego se minimiza la distancia entre el punto dado en la primera superficie y un plano tangente a la segunda superficie en el punto de intersección.

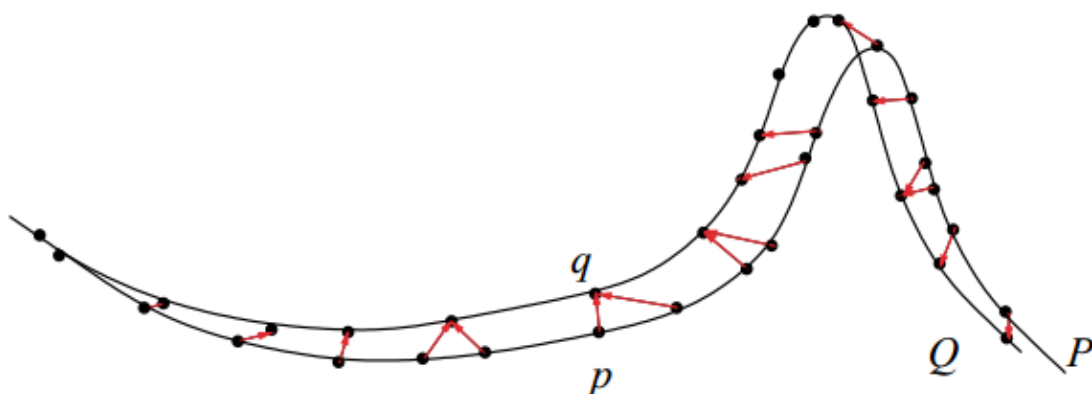


Ilustración 8: Esquema de Alineado Euclidiano de dos vistas

⁴ Es la distancia entre dos puntos en un espacio euclideo la cual se deduce a partir del teorema de Pitágoras.

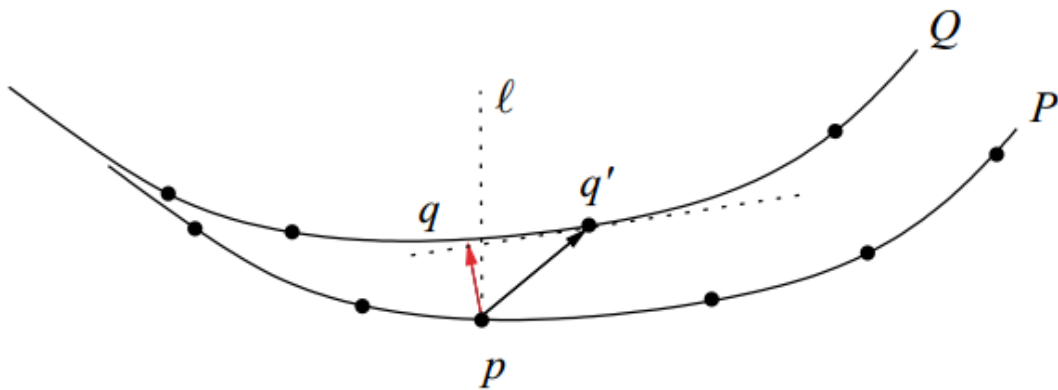


Ilustración 9: Esquema de Alineado Recta-Punto de dos vistas

La segunda técnica tiene la ventaja de que es menos sensible al muestreo no uniforme causado por un movimiento a velocidad variable del escáner.

Line-of-sight Error compensation

Una vez alineados los barridos los puntos idealmente estarán ubicados en la superficie del objeto reconstruido. Aun así se debe considerar el error debido a ruido en la medición, la calibración del sensor y error en el proceso de alineado.

El enfoque estándar para tratar el error residual es definir una nueva superficie mediante el promediado de muestras de los barridos superpuestos. Además antes de realizar la integración de la malla es necesario un filtrado de los puntos atípicos.

Existen numerosos métodos para modelar el error residual y luego calcular los puntos de una superficie optimizada. A continuación se describirá uno de ellos de forma simplificada y a modo de ejemplo.

Partimos de un modelo matemático que tiene en cuenta el ángulo de visión y la distancia en la toma de datos, y expresa el error residual como un elipsoide con una distribución Gaussiana. Otras fuentes de ruido no Gaussiano como sombras, peculiaridades superficiales, etc. que generalmente producen puntos aislados no son tenidos en cuenta en el modelo de error. Para un escáner que opera por triangulación, el error en el eje X e Y es mucho más pequeño que en el eje Z, por lo que el eje del elipsoide en la dirección Z es el más largo.

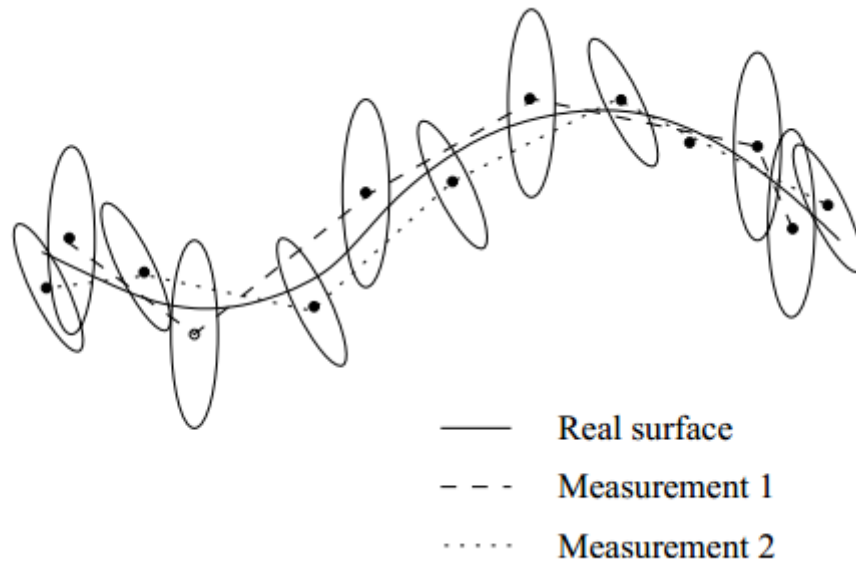


Ilustración 10: Proceso de reconstrucción

Entonces a partir de dos barridos se define un proceso de reconstrucción de la superficie optimizada de la siguiente manera, a partir de un punto en una de las superficies se determina el mejor compañero de forma probabilística, a partir de las tres muestras más cercanas en el segundo barrido y luego el punto óptimo es calculado empleando el estimador de mínima varianza de Kalman.

Resumiendo se debe determinar un modelo matemático para el error residual (existen muchos modelos), se debe determinar la forma de emparejar los puntos de los barridos (existen muchas formas) y se debe calcular la superficie optimizada (se hace promediando de alguna forma los puntos de los barridos emparejados).

Integración de los barridos

Para la mayoría de las aplicaciones es deseable unificar todos los barridos en una superficie no redundante.

El objetivo de la integración es reconstruir la geometría y la topología del objeto escaneado a partir de los datos disponibles. El problema se dificulta debido a que en general los datos contienen ruido, puede haber puntos atípicos, parte de la superficie puede no haber sido escaneada y en general no hay garantía de que los datos sean suficientes para la reconstrucción.

Una primera clasificación de los métodos de integración puede hacerse en base a si los datos de entrada están en forma de una nube de puntos o un conjunto de barridos. La segunda categoría utiliza información adicional como la superficie normal estimada, la superposición parcial de los barridos y la posición del sensor para una mejor estimación de la superficie.

Una segunda clasificación de los métodos está basada en el enfoque adoptado para reconstruir la superficie. Una consecuencia práctica de la elección del enfoque es el tamaño del problema que puede ser resuelto con

determinados recursos informáticos. Nombraremos y describiremos brevemente los distintos enfoques planteados.

Métodos basados en la triangulación de Delaunay

Una red de triángulos Delaunay asociada a un conjunto de puntos en el espacio representa la envolvente convexa del conjunto de puntos. Dado un conjunto $S \in \mathbb{R}^3$, $D(S)$ representa la red de triángulos asociada al conjunto S , los métodos basados en la triangulación de Delaunay reconstruyen la superficie a través de la extracción de un subconjunto de $D(S)$, un proceso a veces llamado sculping.

Métodos basados en la superficie

Este enfoque crea la superficie parametrizando localmente y conectando cada punto con su vecino a través de operaciones locales.

Por ejemplo, un método funciona realizando la triangulación de todos los barridos individualmente, luego son removidos los triángulos redundantes en las áreas de superposición y por último las superficies de intersección son retrianguladas para crear una única superficie. Este tipo de método puede procesar fácilmente grandes conjuntos de datos y compensar pequeños niveles de ruido.

Métodos volumétricos

Los métodos volumétricos ponderan un punto en la superficie de un barrido mediante una función que tiene en cuenta la distancia entre el sensor y la superficie y una ponderación dada por la tecnología del escáner. La función es representada para cada punto en una grilla regular en el espacio y luego se calcula la isosuperficie a través del método de los mínimos cuadrados.

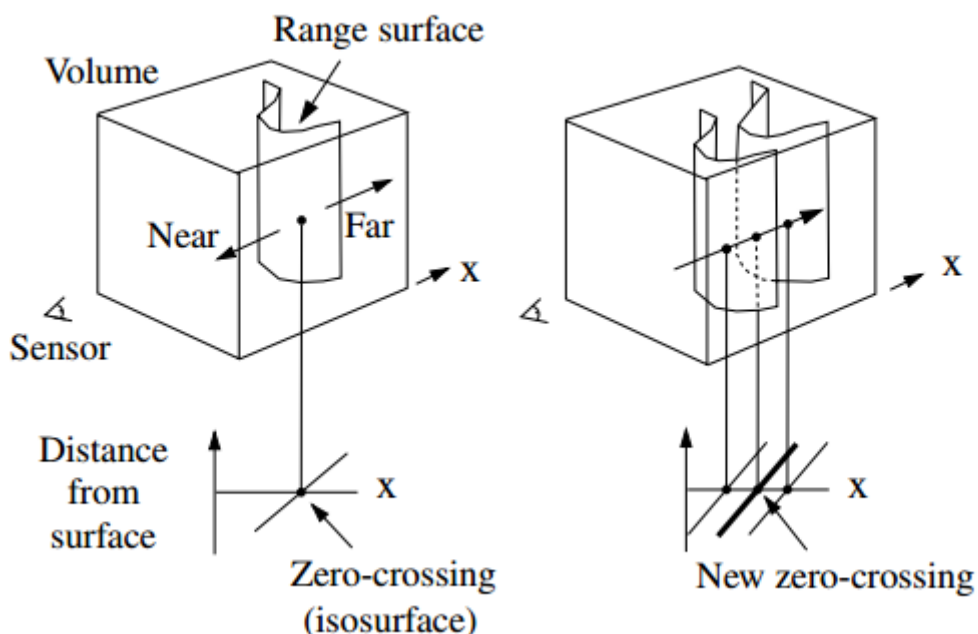


Ilustración 11: Métodos volumétricos

Método de superficies deformables

Utilizan un modelo elásticamente deformable con fuerzas intrínsecas que inducen una preferencia por formas simétricas y las aplican a la reconstrucción de formas a partir de imágenes. El algoritmo también es capaz de inferir el movimiento no rígido de un objeto a partir de una secuencia de

Imágenes.

Postprocesamiento

El postprocesamiento es necesario para adaptar el resultado de la integración a la aplicación que compete.

Dependiendo de la aplicación los procesos más comunes son:

- Reducir la complejidad de la malla.
- Asignar un mapa de texturas a la malla, para lo cual es necesario parametrizar la malla respecto a un sistema de coordenadas en 2D. Lo más simple es tratar cada triángulo por separado.
- Para aplicaciones que implican la animación del modelo es necesario la conversión de la malla a una representación de superficie paramétrica de orden superior, por ejemplo utilizando NURBS⁵.

Para el caso en estudio es necesario realizar una decimación del objeto una vez exportado en formato STL, la decimación es un proceso que reduce la cuenta de vértices/triángulos de una malla con mínimos cambios en la forma. Este paso es necesario para facilitar el procesamiento del modelo por el programa de laminado.

⁵ B-splines racionales no uniformes o NURBS (acrónimo inglés de non-uniform rational B-spline) es un modelo matemático muy utilizado en la [computación gráfica](#) para generar y representar curvas y superficies.

Capítulo 5: Descripción del Proceso De Construcción en el Software Geomagic

Antes de comenzar con la construcción de los modelos es necesario exportar los datos en un formato conveniente y separar cada uno de los barridos en un archivo individual.

Una vez realizados los escaneos correspondientes seguimos por guardarlos en un archivo de formato .fsn⁶ que corresponde al formato de archivo nativo del software PolHemus, este formato es el único que permite editar los datos relevados durante el escaneo e incluso añadir nuevos barridos; también realizaremos una exportación de los barridos en formato .obj⁷; al exportar los barridos solo estamos exportando los datos “en bruto” recogidos por el escáner, es decir los datos sin ningún tipo de procesamiento.

El siguiente paso es separar el archivo que contiene los barridos en varios archivos donde cada uno de ellos contiene un solo barrido en particular, esto facilita el procesamiento en Geomagic ya que nos permite mover o eliminar cada uno de los barridos individualmente. Para ello empleamos el software “SeparadorDeGruposOBJ” desarrollado en el DIBio. El programa creara una carpeta con todos los barridos individualizados en un archivo.

Generalmente tendremos dos carpetas para cada uno de los objetos escaneados, cada una contiene los barridos correspondientes a la cara superior e inferior del objeto respectivamente. En Geomagic importamos las carpetas y creamos un grupo para cada una.

A partir de aquí seguiremos el esquema de trabajo presentado en el capítulo 3 y haremos una correlación entre cada uno de los bloques mostrados en el esquema de “pipeline” y las herramientas que nos proporciona el software para resolver cada uno de ellos.

El caso de ejemplo planteado es el del hueso cigomático izquierdo. Entonces lo que tenemos en un principio son dos grupos formados cada uno por los respectivos barridos llevados a cabo durante el escaneo y queremos llegar a un modelo lo más fiel al original formado por una única superficie. Como se puede observar en la siguiente figura los barridos no están perfectamente alineados, existe ruido, etc.

⁶ FastScan es el formato nativo del software de escaneo.

⁷ WaveFront Obj: es un formato de datos simple que representa solamente la geometría 3D e incluye solo la posición de cada vértice, la posición UV de cada vértice de coordenadas de texturas, las normales y las caras que componen cada polígono.

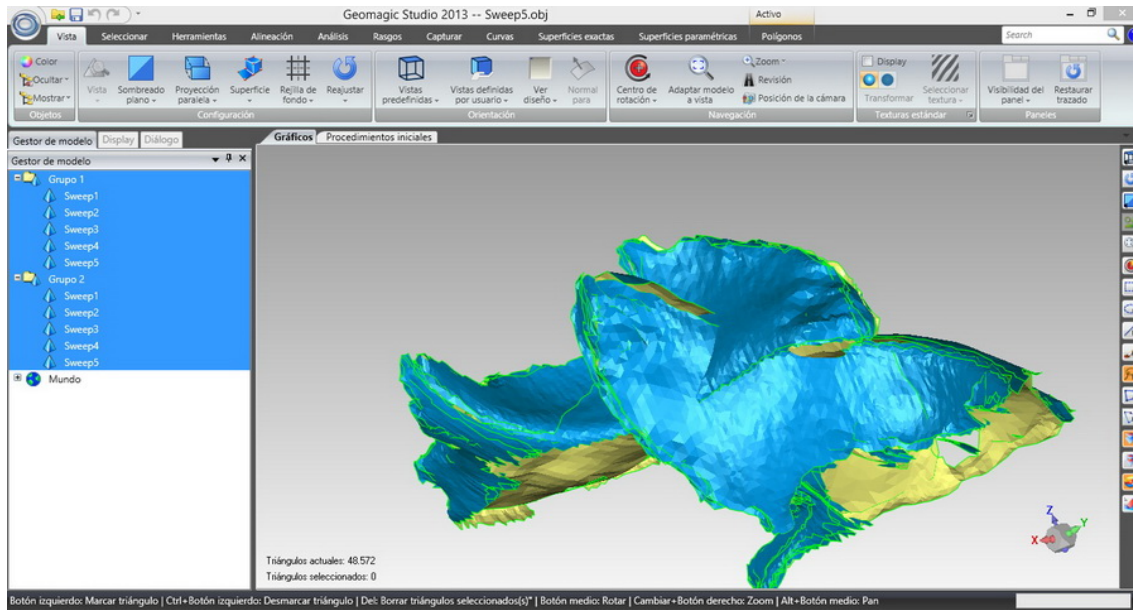


Ilustración 12: Proceso de Edición en Geomagic Studio

Describiremos entonces el procedimiento realizado a cada uno de los grupos. Es posible trabajar los dos grupos o incluso más en simultáneo, dependiendo del rendimiento del equipo informático utilizado.

La primera etapa es la etapa de *alineación o de registro*, y se corresponde al primer bloque del esquema de pipeline. El registro es la reorientación de dos o más superficies (de puntos o polígonos) que forman un único objeto, de forma tal que las partes idénticas de los barridos superpuestos sean coincidentes. Destacamos en este punto que solo se describirán las configuraciones que se modificaron para cada comando, el resto de las configuraciones se dejó en modo por defecto.

Para realizar el registro seleccionamos el grupo de interés del gestor de modelos, nos dirigimos a la pestaña Alineación, luego a Registro Global y por último a Aplicar. Como se explicó anteriormente el enfoque utilizado por este comando es el de Iterative Closest Point (ICP) que se detiene al satisfacer un algún criterio de convergencia. En la siguiente imagen podemos ver el resultado del registro sobre el modelo y los datos arrojados por el programa.

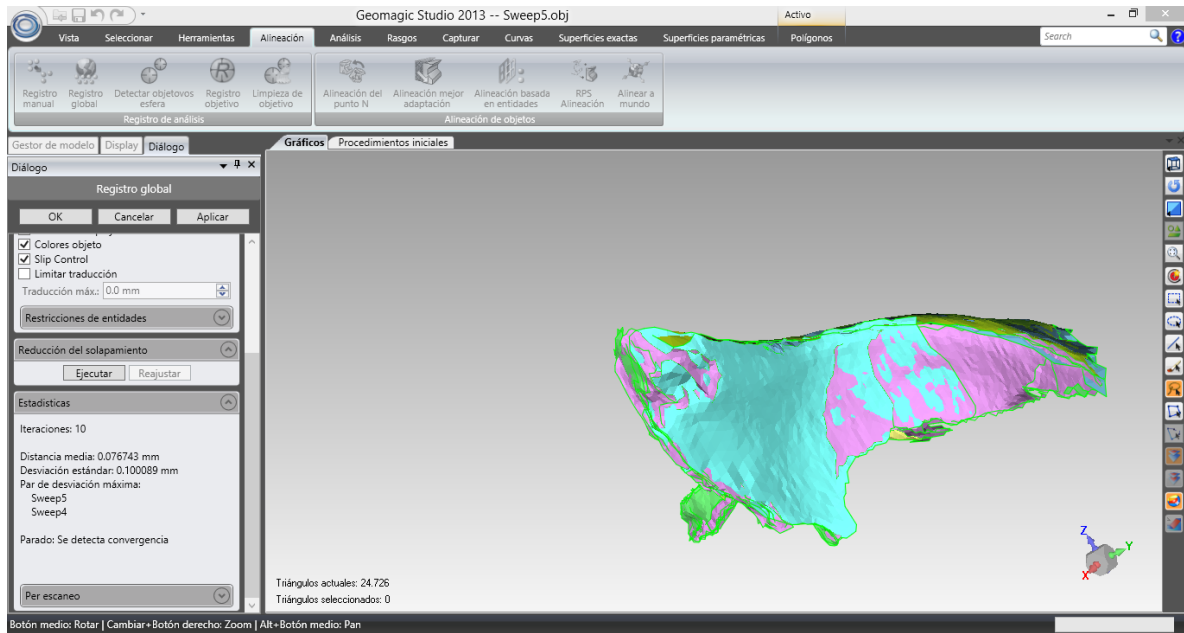


Ilustración 13: Iterative Closest Point

El programa nos brinda el valor de la distancia media entre los barridos y de la desviación estándar, además nos informa cuales son los dos barridos más alejados entre sí. Con esta información, en caso de que sea necesario, podemos emplear otra herramienta para posicionar de forma manual dichos barridos. Para ello seleccionamos uno de los dos barridos, y luego seleccionamos el comando Desplazador de objetos (pestaña Herramientas -> Desplazador de objetos). De esta manera podemos desplazar o rotar el barrido individualmente.

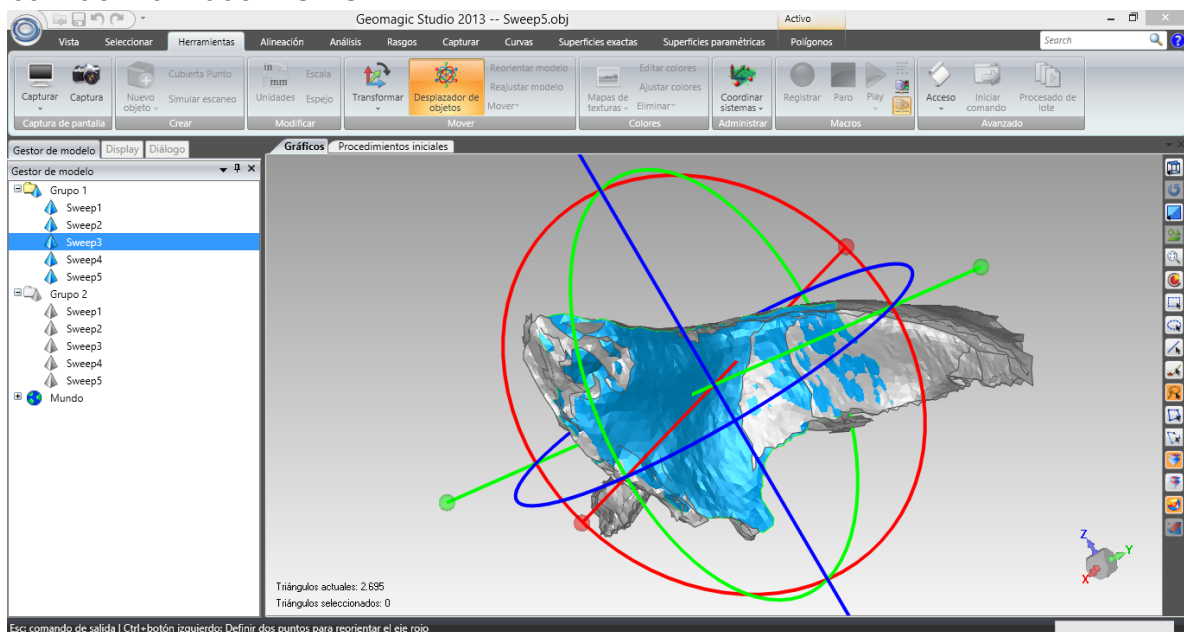


Ilustración 14: Desplazador de objetos

Una vez alineados los objetos hacemos una "Limpieza de bordes". Durante el escaneo de las piezas aparecen "artefactos de borde" que son errores debidos a la reflexión del láser en los bordes de la pieza. Estos artefactos deben ser corregidos eliminando manualmente los polígonos correspondientes (el borrado estará condicionado por el criterio del que lo realice, conociendo la forma de la pieza). Realizamos otro registro global para alinear los barridos libres de artefactos de bordes.

Convertimos la malla de polígonos en nube de puntos (pestaña Polígonos -> convertir en puntos), realizamos un último registro global y combinamos los barridos usando la Herramienta combinar objetos de puntos (pestaña Puntos -> Combinar objetos de puntos).

En esta etapa realizaremos un filtrado de los posibles puntos desconectados y aislados, usando el comando seleccionar (pestaña Puntos -> Seleccionar). En este punto comienza la compensación del error de línea de visión.

Se deben eliminar los elementos desconectados primero y luego los aislados. Un componente desconectado es una "isla" de puntos que está separada de la nube de puntos. Es posible seleccionar tres niveles de separación:

- Bajo: cada componente (grupo de puntos) desconectado es considerado como una "isla", esta es la opción que permite mayor control.
- Medio: cada componente desconectado y sus vecinos cercanos son considerados una "isla".
- Alto: cada componente desconectado y sus vecinos cercanos y moderadamente cercanos son considerados una "isla".

Además de la separación debemos configurar el parámetro Tamaño, el cual debe interpretarse de la siguiente manera, un componente "isla" queda seleccionado cuando su porcentaje, en relación a la nube de puntos entera, es menor o igual al valor en el cuadro de dialogo Tamaño. Para el desarrollo del proyecto se utilizó una configuración de bajo en la separación y 5 en el tamaño.

Consideraciones sobre selección de puntos desconectados. Supongamos que tenemos un objeto que en donde tenemos tres islas de componentes desconectados que representan 5, 10 y 16% del total de puntos del objeto. Además las islas de 5 y 10% están relativamente cercanas entre si mientras que la de 16% está alejada de estas dos.

Si la separación se ajusta en bajo, la isla de 5% se seleccionara cuando el ajuste tamaño llegue a 5. Las islas de 5 y 10% se seleccionaran cuando el ajuste de tamaño llegue a 10 y todas las islas se seleccionaran cuando el ajuste de tamaño llegue a 16.

Si la separación se establece en medio, las islas de 5 y 10% serán consideradas como una sola y quedaran seleccionadas cuando el ajuste de tamaño llegue a 15 y todas las islas quedaran seleccionadas cuando el ajuste de tamaño llegue a 16.

Si la separación se establece en alto, todas las islas serán consideradas como una única isla y quedaran seleccionadas cuando el ajuste de tamaño

llegue a 31. En case a estas consideraciones se seleccionó la configuración utilizada en la construcción de los modelos. La misma junto con todas las configuraciones generales se muestra en la tabla X.

Una vez seleccionados los puntos desconectados se los elimina presionando la tecla suprimir. Al seleccionar los elementos desconectados se debe tener en cuenta que es posible que queden seleccionadas áreas de la nube de puntos que contienen información importante del objeto, sobre todo en objetos formados por nubes de puntos pequeñas.

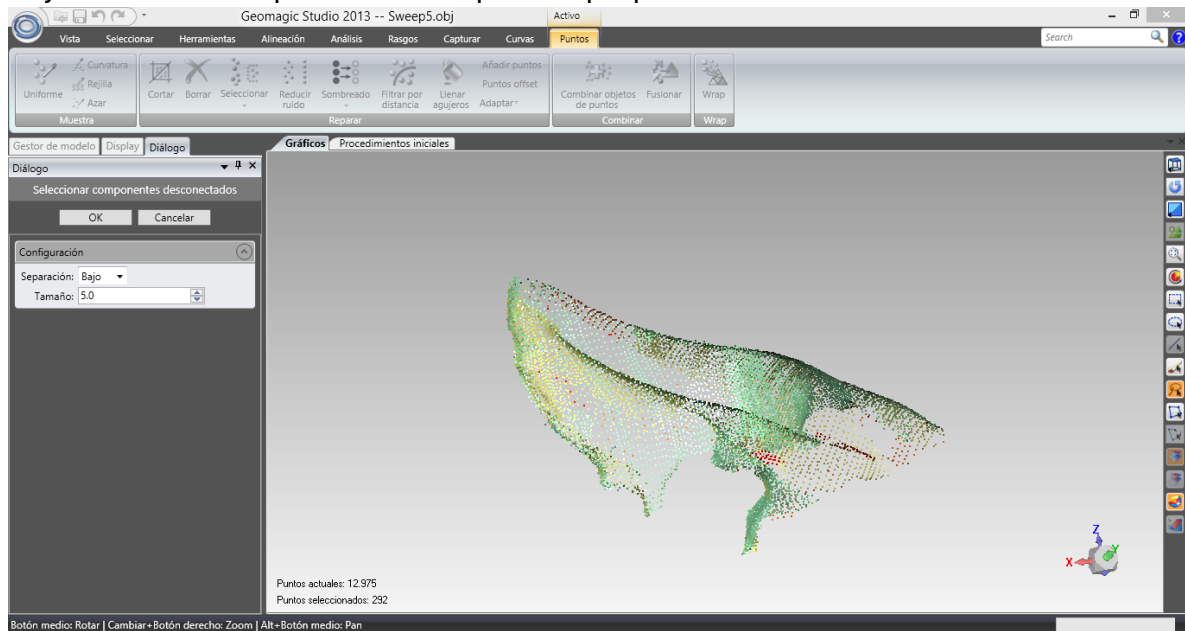


Ilustración 15: Eliminación de puntos desconectados

En este momento debemos seleccionar los puntos aislados (pestaña Puntos -> Seleccionar -> Aislados). Un punto aislado es un punto que se encuentra al menos a una distancia dada del resto de los puntos. En este caso el parámetro a configurar es la sensibilidad, un valor bajo de sensibilidad limita la selección solo a aquellos puntos que se encuentran muy alejados, un valor más alto incluye una gama más amplia de puntos aislados. La sensibilidad seleccionada en esta instancia fue de 85 para el procesamiento de todos los escaneos.

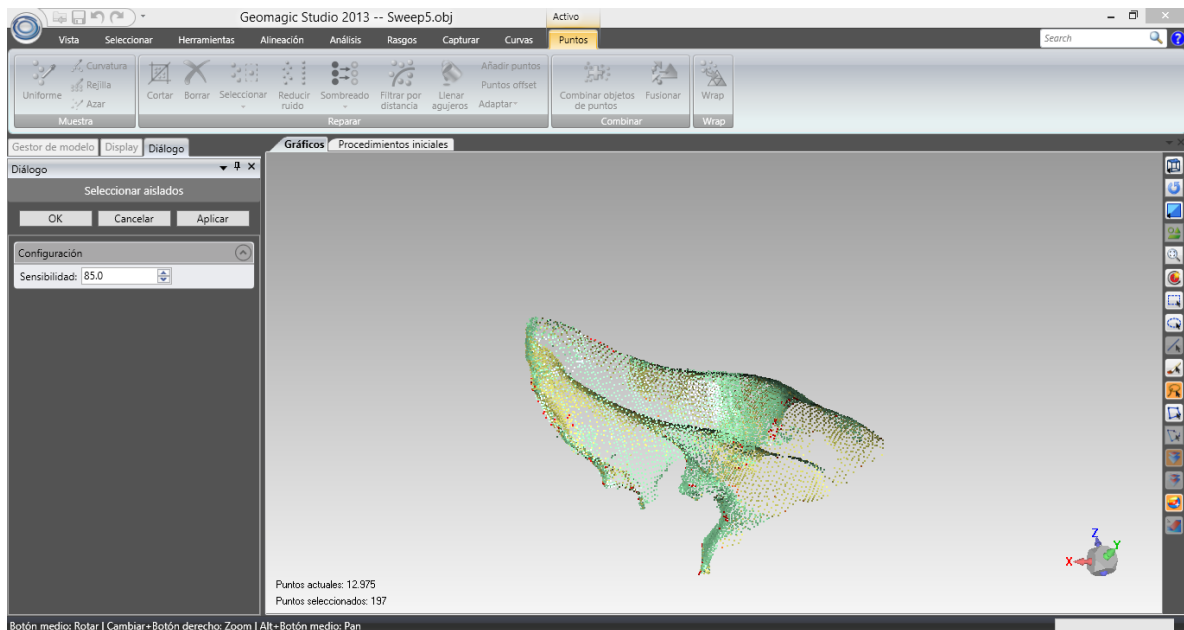


Ilustración 16: Aislado

La siguiente etapa tiene como objetivo reducir el error debido a:

- Ruido en la medición.
- Error en la calibración del sensor.
- Error en el proceso de alineado.

Utilizamos el comando Reducir Ruido, (pestaña Puntos -> Reducir ruido -> Aplicar) esta herramienta puede compensar el error desplazando los puntos a los lugares correctos estadísticamente.

En el área de parámetros tenemos las siguientes configuraciones:

- Según el tipo de objeto con el que se está trabajando seleccionamos el tipo de operación para la reducción de ruido:
 - Formas de forma libre: Si el objeto es una forma libre o forma orgánica, esta opción reduce el ruido con respecto a la curvatura de la superficie.
 - Formas prismáticas (conservadoras): Esta opción mantiene la nitidez de características tales como bordes en una forma mecánica o angular.
 - Formas prismáticas (agresivas): Esta opción mantiene la nitidez de características tales como bordes en una forma mecánica o angular. Al mismo tiempo elimina más puntos aislados para lograr un acabado más suave que en el caso conservador.
- Nivel de uniformidad: determina el nivel con que los puntos aislados son detectados. En esta configuración utilizamos nivel de suavidad bajo y una o dos iteraciones, ya que el propósito de este paso no es suavizar la superficie sino disminuir el ruido.

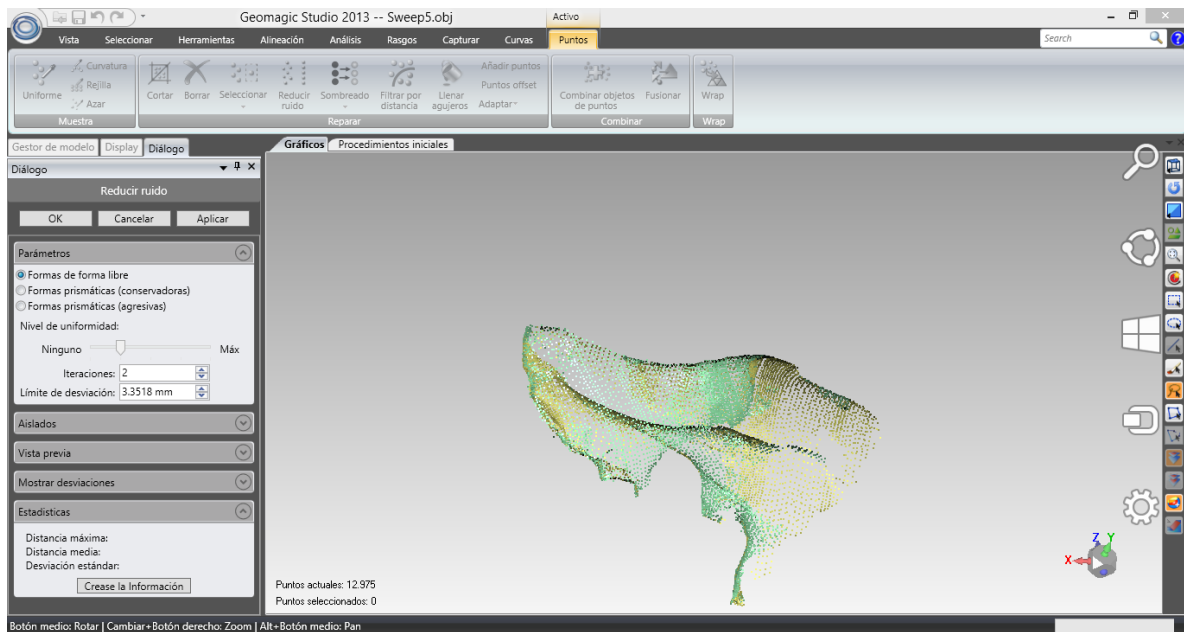


Ilustración 17: Reducir ruido

Convertimos la nube de puntos en malla de triángulos utilizando la herramienta Wrap (pestaña Puntos -> Wrap -> Aplicar).

El procedimiento hasta este punto debe repetirse para cada uno de los escaneos que componen un objeto. Podemos facilitar esta tarea empleando la herramienta de registro de macros (pestaña Herramientas -> Registrar -> Ok). Un macro (abreviatura de macroinstrucción) es una serie de instrucciones que son almacenadas para que puedan ser ejecutadas de manera secuencial mediante una sola llamada. En Geomagic antes de capturar una secuencia de acciones, el sistema solicita al usuario un nombre de macro y un lenguaje de script para almacenarlo. Por ejemplo todas las acciones descritas anteriormente pueden ser almacenadas en un macro.

Una vez procesados los escaneos que componen un objeto debemos posicionar cada superficie en el lugar correcto de manera manual, de forma tal, que luego podamos aplicar un registro global que logre mover cada superficie a la posición correcta verdadera. Para esto empleamos el modulo Registro Manual (pestaña Alineación -> Registro Manual). Para ejecutar un registro manual debemos seleccionar cual será la superficie que permanecerá fija y cual la que se moverá, y luego identificar tres puntos equivalentes en cada superficie.

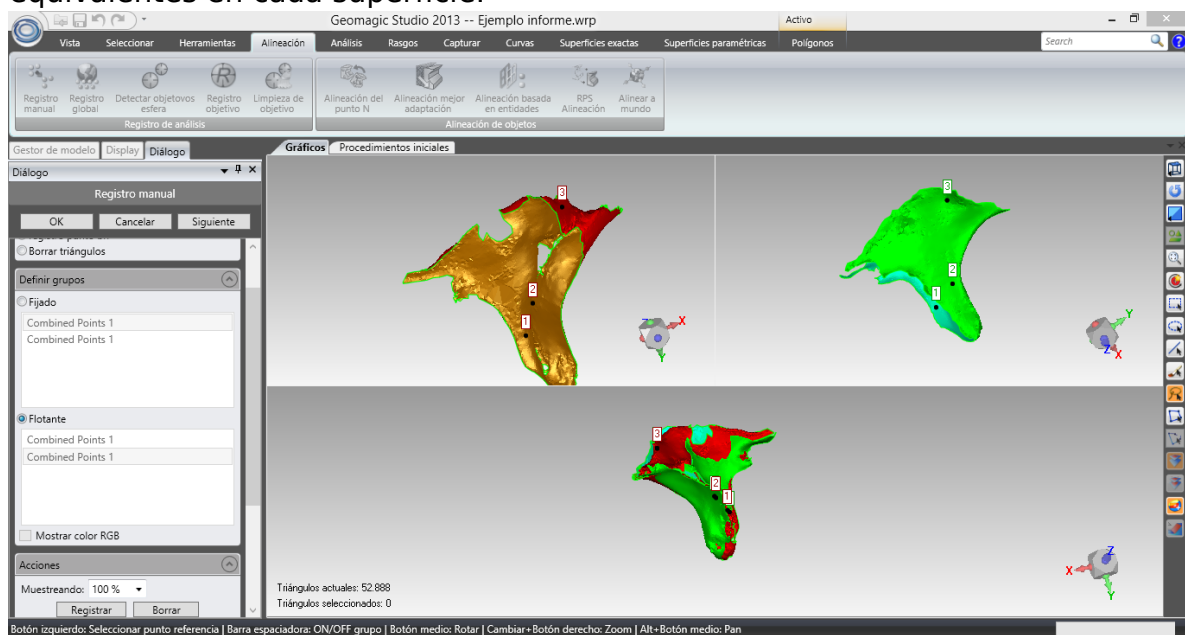


Ilustración 18: Convertir la nube de puntos en malla de triángulos

Aplicamos nuevamente un registro global para realizar el ajuste fino de las superficies, convertimos a puntos, combinamos los objetos y reconvertimos en malla de triángulos.

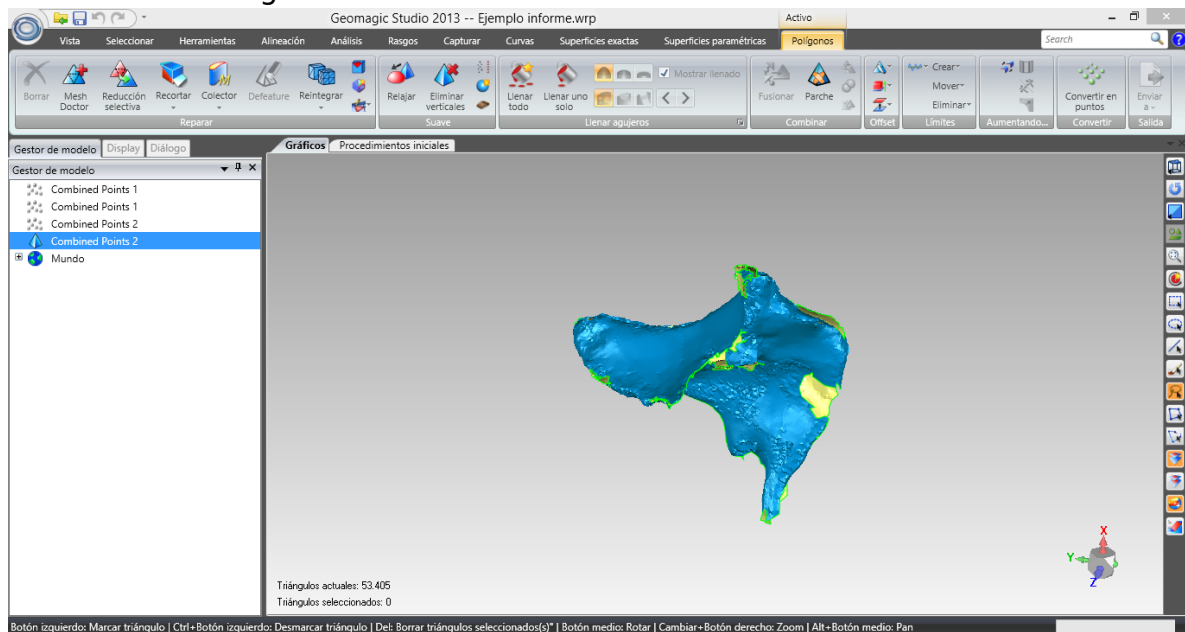


Ilustración 19: combinamos los objetos y reconvertimos en malla de triángulos

Utilizando el comando Llenar todo (pestaña Polígonos -> Llenar todo) cubriremos todos los posibles agujeros. Una vez seleccionado “Llenar todo” todos los agujeros son seleccionados automáticamente y quedan marcados con un contorno rojo. Algunas de las configuraciones posibles son:

- Deseleccionar el más grande: ignora en orden decreciente los agujeros más grandes según el número en el cuadro de diálogo.
- Ignorar agujeros complejos: no rellena agujeros con bordes enroscados.
- Circunferencia máxima: no rellena agujeros con una circunferencia mayor al establecido en el cuadro de diálogo.
- Técnica de relleno:
 - Curvatura: la nueva malla que rellena los agujeros seleccionados debe coincidir con la curvatura de la malla circundante.
 - Tangente: la nueva malla que rellena los agujeros seleccionados debe coincidir con la tangente de la curvatura de la malla circundante.
 - Plano: la nueva malla que llena los agujeros seleccionados es generalmente plana.

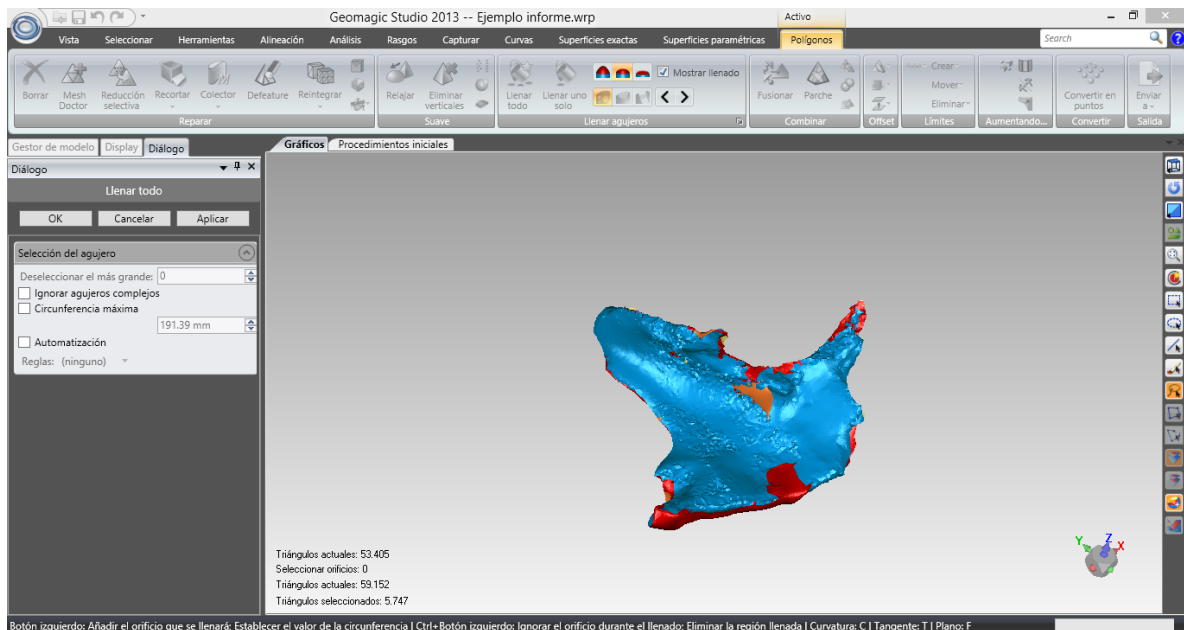


Ilustración 20: Llenar todo para cubrir todos los posibles agujeros

El comando Mesh Doctor proporciona una forma simplificada y automatizada con la que puede reparar la malla del objeto. En el cuadro de dialogo de operaciones debemos seleccionar la operación Reparación automática.

Los defectos que se pueden reparar con la operación Reparación automática son los siguientes:

- Non-Manifold Edges: Estos son triángulos que existen en un borde natural y que no están conectados a la malla en dos de sus lados.

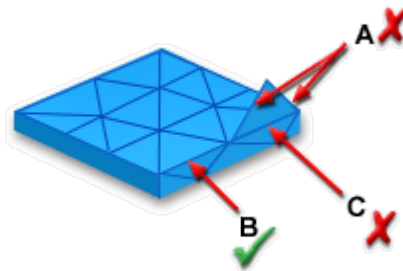


Ilustración 21: Defectos (A, C) Correctos (B)⁸

- Self-intersections: Estos son triángulos que están entrelazados con triángulos vecinos.
- Highly-Creased Edges: Estos son triángulos que se unen entre sí en ángulos agudos.
- Spikes: Estos son conjuntos de tres o más triángulos que forman un punto en una malla mayormente lisa.

8 Imagen obtenida de <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-4C510471-477D-4AC4-AE9B-BA928699FBE1-htm.html>. Última visita 21/10/2016.

- Componentes Pequeños. Estos son conjuntos de triángulos independientes que son tan pocos en número que probablemente representan el ruido.
- Túneles Pequeños. Se trata de construcciones de doble capa en la malla con una apertura frontal y posterior.
- Pequeños agujeros. Estas son aberturas en la malla poligonal que son tan pequeñas que probablemente deben ser llenadas para formar una malla más sólida.

Seleccionamos solo las operaciones factibles de reparar en cada caso. Cuando se abre el comando, las partes de la malla del objeto se seleccionan automáticamente (de color rojo) para su reparación. Es posible seleccionar un área adicional de forma manual para que sea analizada por Mesh Doctor.

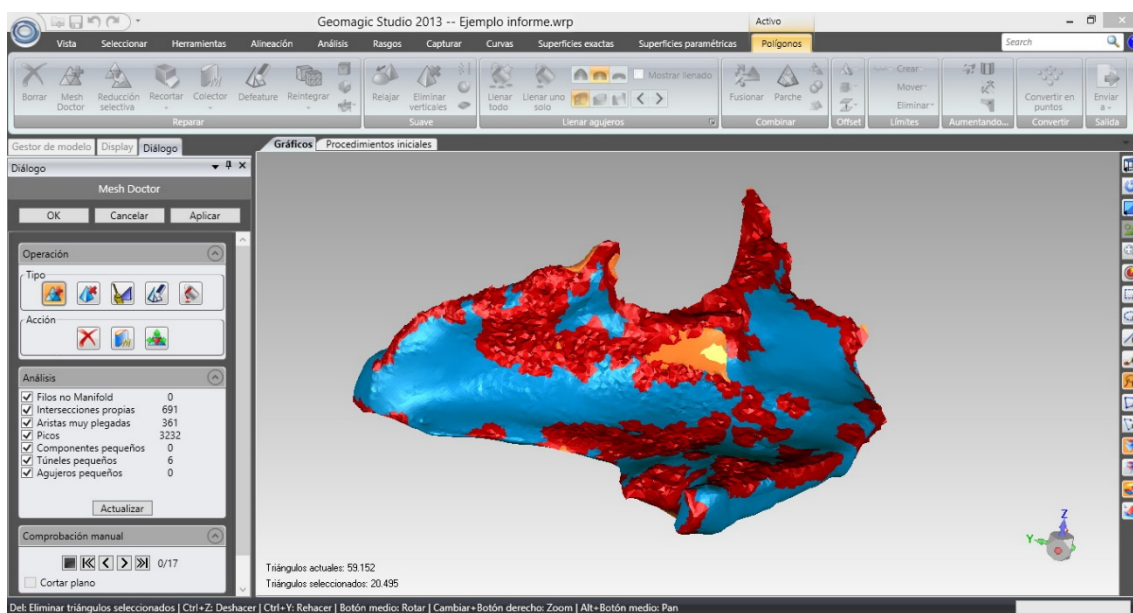


Ilustración 22: Reparar con Mesh Doctor

Comprobamos que las partes seleccionadas son las correctas y aplicamos.

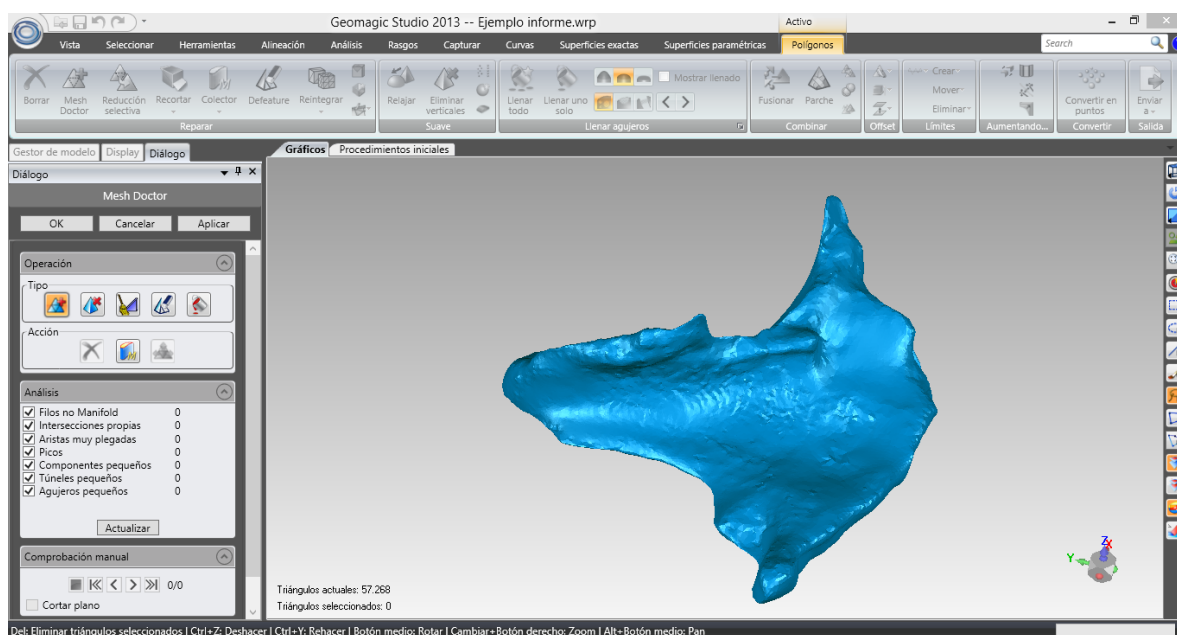


Ilustración 23: Aplicar y Aceptar Mesh Doctor

Es posible detectar y eliminar los picos formados por pocos triángulos utilizando el comando Eliminar Verticales. Seleccionamos el área sobre la cual nos interesa aplicar el comando (si no seleccionamos ningún área el comando se aplicara sobre toda la superficie) y un Nivel de suavidad, mientras mayor sea el nivel de suavidad los picos serán eliminados de manera más “agresiva”.

El último paso es la aplicación del comando Reintegrar (pestaña Polígonos -> Reintegrar), este comando produce un teselado más uniforme. El comando crea triángulos muy uniformes, es posible controlar la longitud de borde promedio al mismo tiempo que se conservan las pequeñas características. Los nuevos vértices de la malla siempre se encuentran sobre la malla original por lo que el resultado es exacto. El reintegrado facilita el posible procesamiento posterior al mismo tiempo que mejora la suavidad del modelo final resultante.

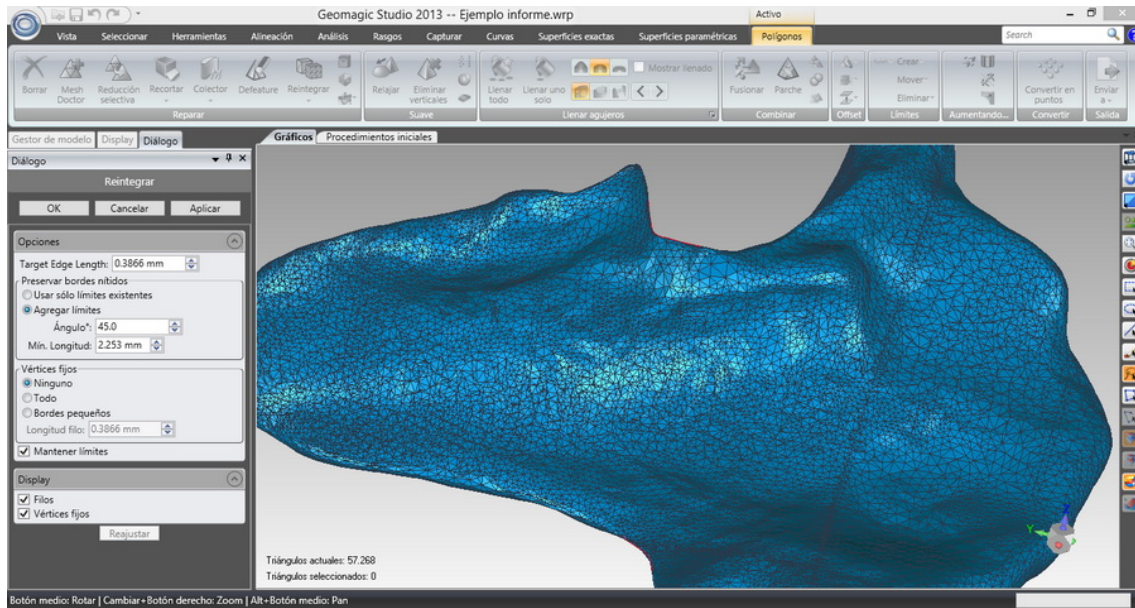


Ilustración 24: detectar y eliminar los picos formados por pocos triángulos

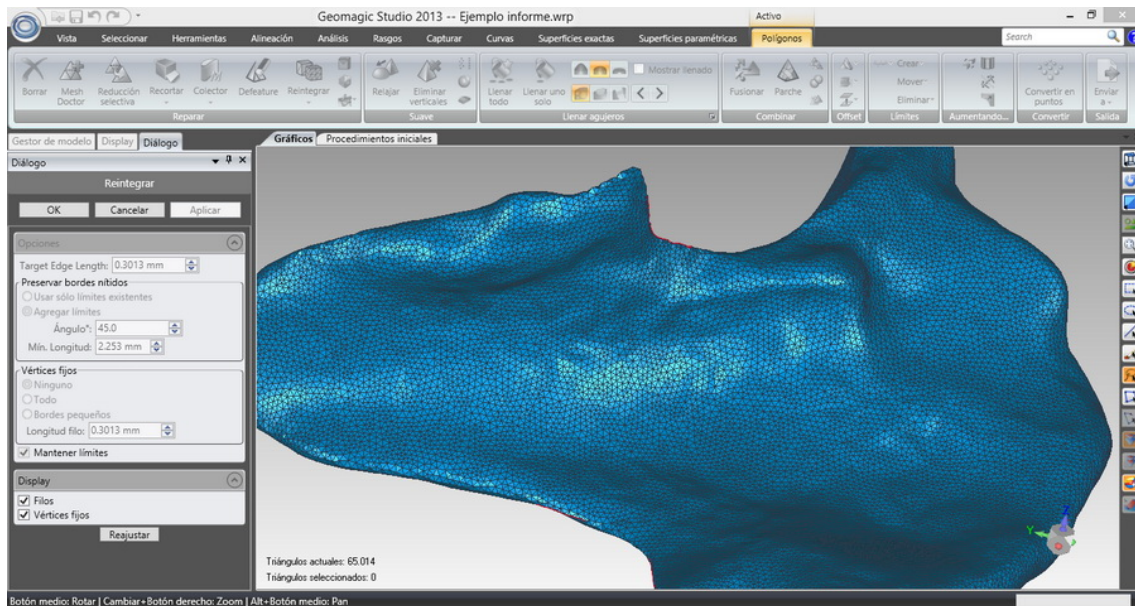


Ilustración 25: Reintegrar

Exportamos el modelo en formato STL y creamos el PDF correspondiente.
Resultado final.

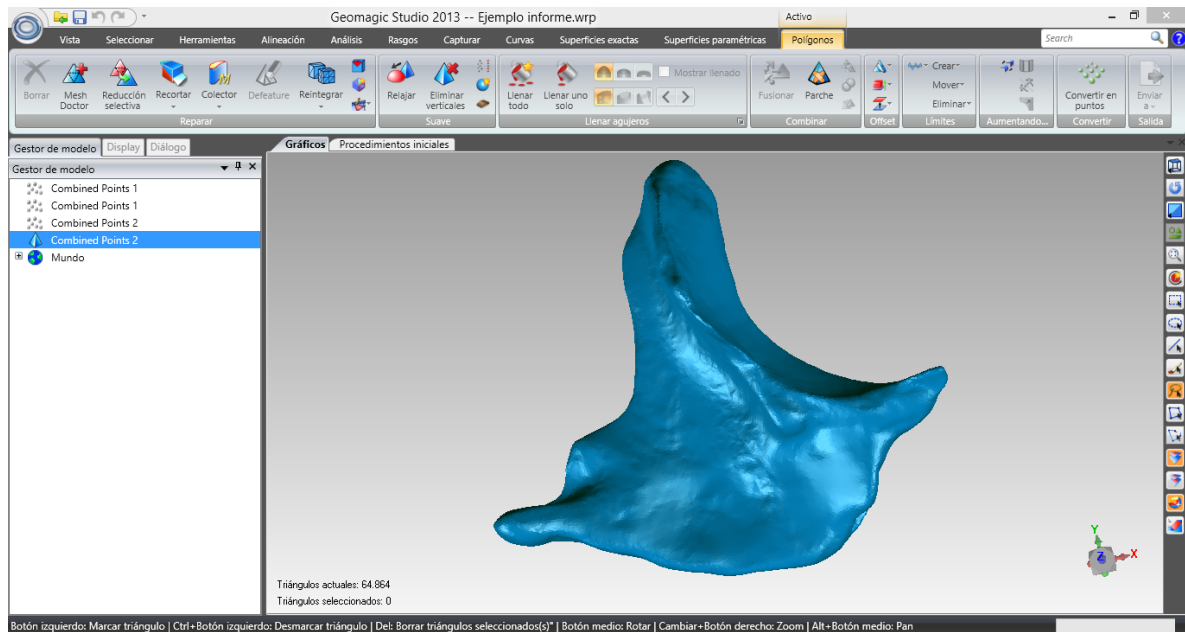


Ilustración 26: Exportamos resultado final

En el anexo 1 encontrara imágenes de los resultados obtenidos para la reconstrucción de un fémur y un cráneo. Además en la siguiente tabla se detallan las configuraciones generales usadas para cada comando.

Comando	Parámetro a configurar	Configuración	Cantidad de iteraciones
Registro global	1. Tolerancia 2. Max iteraciones	1. 0 2. 100	-
Registro manual	1. -	1. -	-
Componentes desconectados	1. Separación 2. Tamaño	1. Bajo 2. 5	1
Componentes aislados	1. Sensibilidad	1. 85	3
Reducir Ruido	1. Tipo de forma 2. Nivel de uniformidad	1. Formas de Forma libre 2. Por defecto	1
Wrap	1. Mantener datos originales 2. eliminar componentes pequeños	1. Marcada 2. Desmarcada	-
Llenar todo	1. Deseleccionar el más grande 2. Ignorar agujeros complejos	1. 0 2. Desmarcada	1
Mesh Doctor	1. Filos no Manifold 2. Intersecciones propias 3. Aristas muy plegadas 4. Picos 5. Componentes pequeños 6. Agujeros pequeños	1. Marcada 2. Marcada 3. Marcada 4. Marcada 5. Desmarcada 6. Marcada	1
Eliminar verticales	1. Nivel de sensibilidad	1. Por defecto	1
Reintegrar	1. Usar solo limites por defecto 2. Agregar limites 3. Vértices fijos 4. Mantener limites	1. Desmarcada 2. Marcada 3. Ninguno 4. Marcada	1

Tabla 1: configuraciones generales para cada comando.

Capítulo 6: Nociones básicas sobre prototipado rápido

El termino prototipado rápido esta aplicado a una gama de tecnologías que puede fabricar objetos en una sola etapa, directamente a partir de su descripción en un archivo CAD.

Los siguientes conceptos se pueden utilizar para describir este tipo de tecnologías:

- Fabricación de formas libre: este concepto hace hincapié en que este tipo de tecnología es totalmente independiente de la forma geométrica y cualquier aumento en la complejidad de la forma del objeto no necesariamente lo hace más difícil de fabricar.
- Fabricación automatizada: gran parte de la fabricación del objeto se lleva a cabo sin la intervención humana. Esto puede considerarse una gran ventaja en términos de mayor velocidad de fabricación, rendimiento y menor requerimiento de mano de obra.
- Fabricación aditiva basada en capas: se simplifica el complejo proceso de fabricación 3D a una serie de capas 2D añadida una sobre la otra.

A modo integrador de estos conceptos diremos que los modelos se crean uniendo capas de material añadidas una sobre la otra. Si las capas son lo suficientemente delgadas los modelos se aproximan al diseño original previsto. Para la mayoría de las aplicaciones un espesor de capa de 0,1mm parece ser suficiente.

Las capas son factibles de ser realizadas de distintas formas por lo que hay distintas máquinas de RP, antes de realizar una descripción breve de cada una expondremos algunas de las limitaciones de la tecnología.

- Espesor de capa (Layer thickness): como ya se mencionó un espesor de capa de 0,1mm es suficiente para la mayoría de las aplicaciones, el mejor espesor de capa disponible comúnmente es de 0,02mm pero se debe ser consiente que un espesor de capa menor significa un proceso de construcción más lento, de hecho este es el factor más significativo a la hora de determinar el tiempo de impresión.
- Precisión de la pieza: hay una serie de problemas de precisión que afecta la fabricación de piezas. La repetitividad de los procesos de fabricación por RP es de algunas micras, pero la contracción parcial debido a restricciones del material y del proceso puede conducir a tolerancias en el orden de algunas décimas de milímetro.
- Tamaño de la pieza: aunque estas máquinas son independientes de la geometría del objeto están limitadas por el volumen de trabajo de la máquina. La mayoría de las maquinas trabajo con volúmenes de orden de los 5000mm³.
- Materiales: la mayoría de los materiales con los que trabajan estas máquinas son poliméricos por la capacidad que presentan a la hora de combinarse las capas.
- Resistencia física de las piezas: debido a que las piezas están formadas por capas que están unidas entre sí de alguna manera, estos sitios de unión representan debilidades en la estructura total.
- Tiempo de fabricación: las piezas toman entre un par de horas hasta incluso días en ser fabricadas, dependiendo de la tecnología elegida y del tamaño de la pieza. Si bien se trata de una mejora respecto a

técnicas convencionales siempre existe una exigencia mayor en cuanto a tiempo.

Estereolitografía y otros sistemas de tipo resina

Las primeras máquinas de RP fueron sistemas basados en resina, esta tecnología es llamada estereolitografía. La resina es un polímero fotosensible líquido que endurece cuando se expone a radiación ultravioleta (UV). La luz ultravioleta proviene de un láser que se controla para diagramar la forma de la sección transversal correspondiente a cada capa. El láser penetra en la resina a través de una corta distancia que corresponde al espesor de capa. La primera capa está unida a una plataforma que baja una distancia igual al espesor de capa y se realiza un nuevo barrido del láser para formar la nueva capa. El proceso continua hasta completar la pieza.

Debido a que la resina circundante no alcanzada por el láser esta todavía líquida, cualquier característica sobresaliente de la pieza debe ser soportada para que no se desplome bajo su propio peso. Al ir construyendo capa a capa algunas regiones pueden irse formando de forma separada a la estructura principal, estas regiones deben ser soportadas también para que no floten en la parte superior de la resina.

La exactitud de esta tecnología se considera generalmente como la mejor de todas las máquinas de RP y la resina generalmente es transparente o translúcida. Existen resinas desarrolladas específicamente para aplicaciones médicas que pueden ser coloreadas selectivamente mediante la sobreexposición al laser UV, esta característica puede ser usada para resaltar características dentro de la pieza como por ejemplo el árbol vascular. Luego de la fabricación las piezas son fijadas con una laca que protege a la pieza de los rayos UV.

Modelado por deposición fundida y sinterizado laser selectivo

Estas tecnologías utilizan calor para fundir el material base del que se fabrican las piezas. En la deposición fundida (FDM) el material es fundido en un pequeño trayecto de algunos milímetros justo antes de ser extruido. En el sinterizado laser selectivo (SLS) el material es depositado en una plataforma en forma de polvo y es fundido por un láser en cada sección transversal

Ambos procesos dan por resultado piezas que son relativamente resistentes al calor comparado con las fabricadas por otros métodos de RP.

Dado que las piezas fabricadas por FDM se extruyen sobre una plataforma una, capa sobre la siguiente, las características sobresalientes requieren soportes como en el caso de SLA. Estos soportes deben ser removidos en un proceso de postprocesado y existen dos métodos de trabajar con ellos, en uno de ellos se crean soportes con propiedades mecánicas diferentes lo que posibilita que sean removidos fácilmente. El otro método utiliza soportes que son creados con un material soluble en agua, esto permite que la interfaz del soporte sea mucho más acabada y además permite eliminar fácilmente soportes de difícil acceso. En el segundo enfoque se requiere de dos cámaras de extrusión independientes y tal vez sea más interesante recrear una estructura utilizando dos colores en lugar de usar una de las cámaras de extrusión para crear los soportes, representando por ejemplo la zona sana de un color y la enferma de otro.

En la actualidad están comenzando a verse en el mercado sistemas que pueden utilizar hasta cuatro materiales distintos en una impresión.

Dado que la tecnología SLS produce piezas a partir de un sustrato en polvo que cubre toda la plataforma, fundiendo selectivamente el material en cada capa transversal, la ventaja principal es que no requiere soportes y no se desperdicia material creando los soportes. Además esto reduce el tiempo de postprocesamiento ya que solo debe limpiarse el polvo que no fue sinterizado como el de pre configuración, porque no es necesario orientar la pieza ni generar los soportes. Las piezas presentan una textura ligeramente porosa y la resistencia mecánica es similar a la de piezas fabricadas por métodos convencionales. Utilizando un material adecuado se pueden generar piezas adecuadas para la aplicación de procesos de colada de inversión. La técnica de colada inversa puede aplicarse con metales biocompatibles para aplicaciones biomédicas. La principal ventaja de estos métodos es su versatilidad.

Las maquinas SLS son considerablemente más caras que el resto. Por otro lado la tecnología FDM es mucho más lenta que la mayoría de los procesos RP.

Modelado por inyección de tintas

Sistemas más recientes aprovechan la tecnología de chorro de tinta. Hay dos formas principales en las que se usa la deposición de tintas: gota sobre polvo y gota sobre gota. Los sistemas gota sobre polvo utilizan un aglutinante sobre un polvo. Las máquinas RP de este tipo también pueden depositar material de distintos colores haciéndolas útiles para hacer piezas multicolor. A menudo estas máquinas se utilizan como ayuda para la comunicación de conceptos donde el médico ilustra un procedimiento propuesto a un paciente o a otro médico. Las propiedades mecánicas de estas piezas están entre las más pobres de las fabricadas por tecnología RP. Los sistemas gota a gota depositan el material en forma líquida que se solidifica inmediatamente después, esto se consigue mediante enfriamiento activo o mediante un proceso de foto endurecimiento similar al de SLA.

Desventajas del prototipado rápido

Una de las principales desventajas es el costo, las máquinas que poseen características de gran exactitud, versatilidad de materiales etc. suele ser muy costosa.

Además del costo las propiedades de los materiales utilizados dejan mucho que desear, en algunos casos los materiales no son ni siquiera aptos para ser esterilizados. Las propiedades mecánicas de los materiales son generalmente pobres, con piezas que generalmente no son capaces de soportar un uso constante. Un objetivo de la investigación en el área de RP es desarrollar una tecnología capaz de fabricar productos finales que soporten el uso constante y las condiciones del entorno. El término prototipado rápido es ambiguo. Muchas veces las piezas son usadas como productos finales y otras veces las piezas requieren demasiado tiempo para ser impresas.

Por último, es probable que la experiencia para operar una máquina de RP no esté disponible en todos los establecimientos

Capítulo 7: Diseño Del Sitio Web

<http://3danato.cim.unc.edu.ar/>

El sitio web que acompaña al trabajo de relevamiento y procesado de los datos tiene por objetivo permitir el acceso de las personas interesadas de forma masiva y de una manera simple. A continuación se presenta el mapa del sitio web.

- Página principal
 - Cráneo y cara
 - Columna vertebral
 - Caja torácica
 - Miembro superior
 - Miembro inferior
- ¿Cómo imprimir?
- Sobre 3danato
- Contacto
- Tabla de descargas

Se puede acceder a la descarga de los archivos de dos formas:

1. Una forma intuitiva, navegando a través de las capas a partir de la imagen que aparece en la página principal.
2. Una forma práctica, buscando el nombre del archivo de interés en el buscador de la sección tabla.

La imagen de partida en la página principal del sitio presenta cinco regiones identificadas por color y que corresponden a las cinco regiones principales a partir de las cuales se describe la anatomía humana. Una vez seleccionada una de las regiones el sitio nos redirige a una página dedicada a dicha región (capa 2). En esta página dedicada vemos una imagen más detallada de la región seleccionada y en algunos casos podemos seleccionar mediante un clic el hueso de interés y proceder directamente a su descarga. En otros casos como el caso de pies, manos... debemos avanzar hacia un tercer nivel donde podremos descargar los datos correspondientes.

En el anexo 2 encontrara capturas de pantalla del sitio, donde se pueden apreciar las regiones antes mencionadas y el enfoque de navegación en capas que plantea el sitio.

Por otro lado podemos proceder a la descarga de un determinado archivo a partir de una página que contiene una tabla con un buscador. A continuación se presenta el formato de la tabla.

Región anatómica	Subregión anatómica	Hueso	Detalle	Link de descarga
<i>Miembro inferior</i>	<i>Pierna</i>	<i>Fémur Der</i>	<i>25cm de longitud</i>	<i>...</i>

Tabla 2: fragmento de tabla de contenidos del sitio

Además el sitio web cuenta con una página de blog titulada “¿Cómo imprimir?” con información relacionada a impresión 3d, como obtener modelos 3d a partir de imágenes médicas, etc.

En el anexo 3 encontrara una tabla con todos los modelos construidos ordenados de acuerdo a la regio y subregión anatómica a la cual pertenecen.

Capítulo 8: Resultados Y Conclusiones

Los modelos construidos tienen una semejanza muy alta con los huesos originales escaneados. La superficie generada en cada modelo tiene que cumplir el requerimiento de que debe ser una superficie cerrada. Este requerimiento se debe a que para ser impresos, como se mencionó en el capítulo correspondiente, el modelo debe ser procesado a través de un programa de laminado y los programas de laminado para RP solo admiten superficies cerradas.

Existen algunos casos en los que los huesos poseen conductos internos o agujeros estrechos y profundos, como es el caso del conducto dentario inferior en la mandíbula. En estos casos el escáner no es capaz de tomar datos de las superficies internas de los conductos. Por lo que dichas superficies debieron ser reconstruidas mediante software (Geomagic) y es evidente que en estos casos la longitud o el diámetro de los conductos en los modelos generados podrá no ser exactamente igual a la de los huesos originales.

Otra consideración son los bordes demasiado filosos e irregulares como por ejemplo las suturas de los huesos que conforman el cráneo, las superficies anfractuosas que exhiben algunos huesos normalmente como el hueso etmoides o en zonas donde el modelo original estaba roto o desgastado y exhibía su interior trabecular. Este tipo de superficie causa distorsión del haz e incluso en los casos extremos de delgadez de las paredes o bordes, el haz laser era capaz de atravesarlos y ser nuevamente distorsionado en la pared o estructura que le siguiera en continuidad. En los modelos con estas características los bordes filosos o superficies anfractuosas se observan en los modelos generados también como bordes filosos o superficies anfractuosas pero tal vez no con la geometría exacta del modelo original.

Las siguientes imágenes ejemplifican la aplicación del proceso completo planteado en el proyecto para cada una de las piezas escaneadas:



Ilustración 29: Vertebra escaneada (Axis)

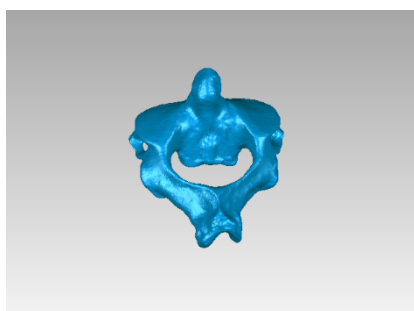


Ilustración 28: modelo digital reconstruido



Ilustración 27: biomodelo de la vértebra axis

Se considera que las discrepancias entre los modelos construidos y los originales son totalmente irrelevantes a los fines didácticos, educativos y de preservación de los modelos construidos.

En conjunto los modelos construidos poseen las siguientes características:

1. Trazabilidad de su contenido: los elementos óseos a partir de los cuales se hicieron los relevamientos para la generación de los modelos pertenecen y están registrados en la cátedra de anatomía de la facultad de ciencias médicas de la universidad nacional de córdoba.
2. Escalable: la base de datos contiene 206 modelos 3D correspondientes a cada uno de los huesos de un humano. Esto representa solo una pequeña porción de la anatomía, con lo cual existe gran cantidad de estructuras que podrían ser agregadas.
3. Permite la preservación de material: por más que los huesos originales sean destruidos la información contenida en ellos no desaparece pudiendo incluso multiplicarse mediante la fabricación por RP.
4. Contiene dos tipos de formato para cada modelo: un formato que requiere de bajos recursos informáticos, pensado para los usuarios que solo desean visualizar el modelo y en la mayoría de los casos no requiere ninguna otra tarea por parte del interesado más que descargar el fichero correspondiente, el PDF y otro formato óptimo para ser utilizado en la fabricación de un biomodelo por RP, que es el STL.
5. Es de acceso libre y gratuito a nivel local: pueden ser usados sin costo por estudiantes, educadores, profesionales e investigadores en el territorio de la Nación Argentina.

En conclusión el desarrollo de este proyecto ha generado una base de datos de aproximadamente 230 modelos (460 archivos si se tienen en cuenta los dos formatos) que brinda a los estudiantes, profesores e investigadores en todo el mundo un recurso didáctico de acceso masivo y simultaneo, permitiendo aun la preservación de los componentes originales y representa una base para futuros trabajos.

Bibliografía y referencias:

- [1] F. B. a. H. Rushmeier, «The 3D Model Acquisition Pipeline,» *COMPUTER GRAPHICS forum*, 2002.
- [2] B. Curless, «From Range Scans to 3D Models,» *Computer Graphics*, 1999.
- [3] PolHemus, *FastSCAN Brochure*, 2008.
- [4] PolHemus, «Sitio ofical PolHemus,» 2016. [En línea]. Available: <http://polhemus.com>.
- [5] PolHemus, *Ficha tecnica PolHemus FastTrack*, 2002.
- [6] H. Edelsbrunner, «Surface reconstruction by wrapping,» 1996.
- [7] «Blender Manual,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.blender.org/manual/es/modeling/modifiers/generate/decimate.html>.
- [8] I. Gibson, *Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications*, Hong Kong: Wiley, 2005.
- [9] A. Marambio, P. Garcia-Almirall y J. Corso, «Museo Maritimo de Drassanes: levantamiento con escaner laser terrestre, planimetria y modelo 3D,» *Drassana*, pp. 104-119, 2011.
- [10] E. Mesa Múnera, J. F. Ramírez Salazar y J. W. Branch Bedoya,] «Construcción de un modelo digital 3D de piezas precolombinas utilizando escaneo láser,» *Revista Avances en Sistemas e Informática*, pp. 119-128, 2010.
- [11] Z. Zhao y L. Laperrière, «Adaptive Direct Slicing of the Solid Model for] Rapid Prototyping,» *International Journal of Production Research*, pp. 69-83, 2010.
- [12] M. Delgado-Rosas, E. Gorrostieta-Hurtado, J. M. Ramos-Arreguín, J. C.] Pedraza-Ortega y M.-A. Aceves-Fernández, «OBTENCIÓN DE MODELOS EN RESINA EPÓXICA DE UN FÉMUR,» *MEMORIAS DEL XV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, pp. 391-400, 2009.
- [13] A. Monsalvo, «Guía para la generación de modelos digitales 3D con] escáner láser,» Cordoba.
- [14] B. Curless y L. Marc, «A Volumetric Method for Building Complex Models] from Range Images,» 1996. [En línea]. Available: <https://graphics.stanford.edu/papers/vorange/>.
- [15] 3. System, Geomagic User Guide, 2013.]
- [16] B. Fausto y R. Holly, «The 3D Model Acquisition Pipeline,» *COMPUTER] GRAPHICS forum*, pp. 149-172, 202.
- [17] M. C. Nuria, *Documentacion del material arqueologico mediante] tecnicas de registro 3D*, Valencia, 2014.
- [18] H. Nicholas A., C. Nicholas, D. Kaitlyn, M. Herbert, P. Jesse, S. Robert y v.] W. Myriam, «El Laboratorio de Virtualización 3D de Idaho,» *Virtual Archaeology Review*, pp. 21-31, 2014.
- [19] J. J. P. Francisco Díaz Gómez¹, B. B. Amparo, A. R. Bárbara y H. J. Juan,] «Modelado 3D para la generación de patrimonio virtual,» *Virtual Archaeology Review*, pp. 29-37, 2015.
- [20] W. J. Branch y G. Sanchez Torres, «Revision general de modelos de] reconstruccion tridimensional desde imagenes de rango,» *Revista avances enSistemas e Informatica*, pp. 23-31, 2008.
- [21] J. Torres, P. Cano, J. Melero, M. España y J. Moreno, «Aplicaciones de la

-] digitalización 3D del patrimonio,» *Virtual Archaeology Review*, 2010.
- [22] J. M. Tejado Sebastian, «Escaneado en 3D y prototipado de piezas arqueológicas: las nuevas tecnologías en el registro, conservación y difusión del patrimonio arqueológico,» *IBERIA*, pp. 135-158, 2005.
- [23] S. C. Loaiza Rodríguez, «LA IMPRESIÓN 3D COMO RECURSO EDUCATIVO PARA LA INNOVACIÓN DE LA ENSEÑANZA Y EL DESARROLLO DE LA CREATIVIDAD EN LOS ALUMNOS DE PRIMER AÑO DE BACHILLERATO, EN LA ASIGNATURA DE HISTORIA Y CIENCIAS SOCIALES, DEL COLEGIO DE BACHILLERATO EMILIANO ORTEGA ESPINOZ,» LOJA, 2016.
- [24] PolHemus, Fast Scan User Manual Revision 4.0, New Zealand, 2014.
-]

Anexos

Anexo 1: imágenes de los resultados obtenidos para distintas reconstrucciones

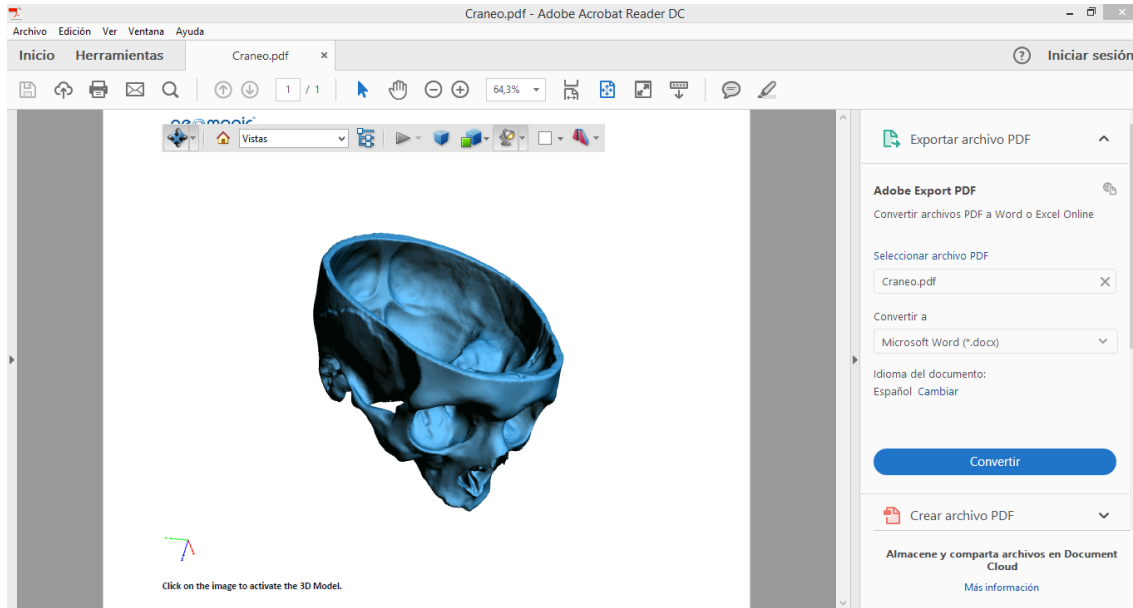


Ilustración 30: reconstrucción de un cráneo vista desde Adobe Acrobat

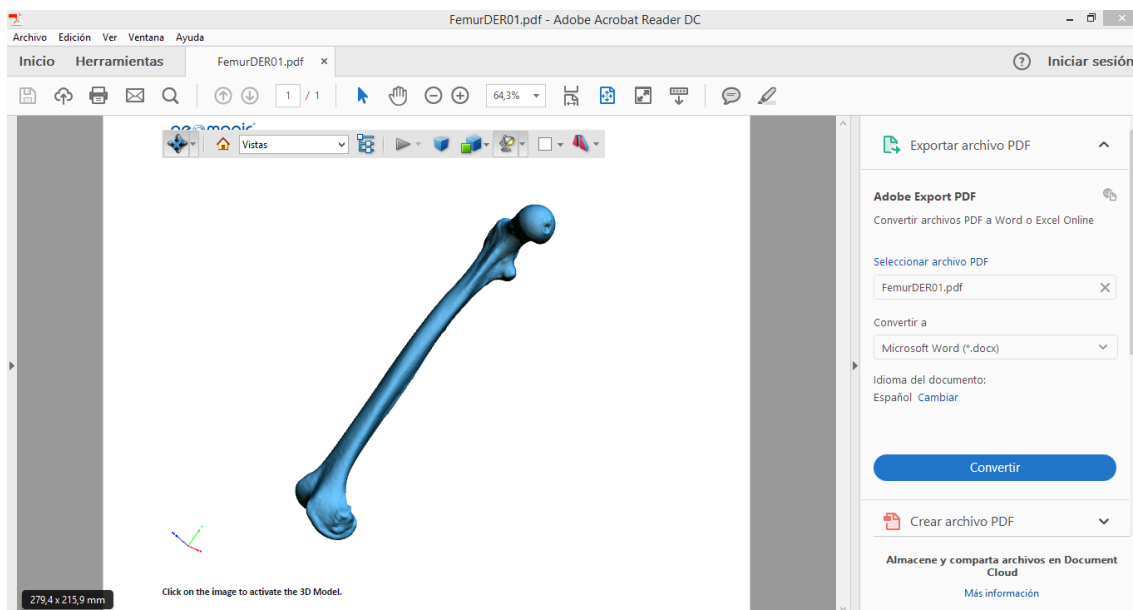


Ilustración 31: reconstrucción de un fémur vista desde Adobe Acrobat

Anexo 2: navegación en capas

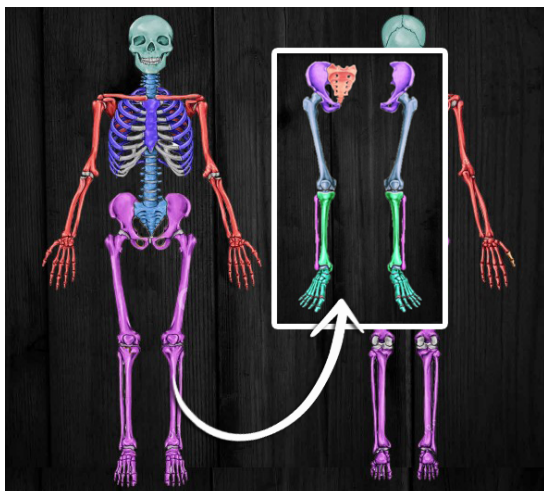


Ilustración 34: navegación capa miembro inferior

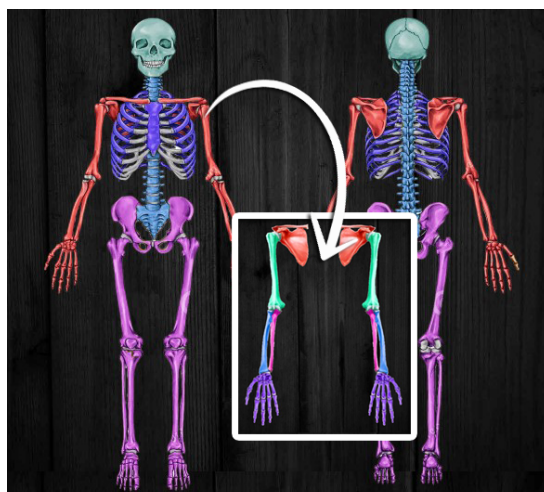


Ilustración 32: navegación capa miembro superior

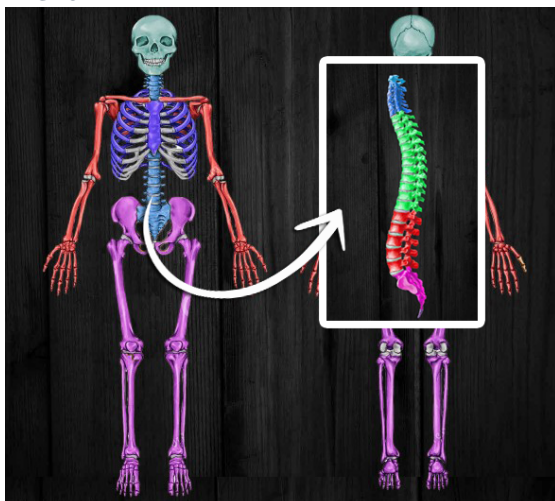


Ilustración 33: navegación capa columna vertebral

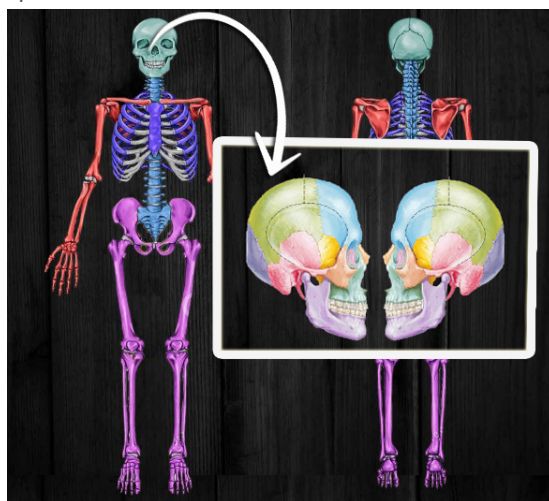


Ilustración 35: navegación capa cráneo y cara

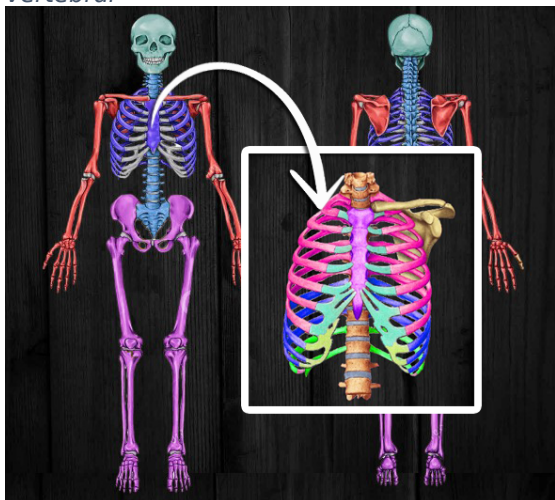


Ilustración 36: navegación capa tórax

Anexo 3: tabla de modelos construidos

Región anatómica	Subregión anatómica	Hueso
CRÁNEO	Cráneo	Frontal
CRÁNEO	Cráneo	Frontal
CRÁNEO	Cráneo	Parietal DER
CRÁNEO	Cráneo	Parietal IZ
CRÁNEO	Cráneo	Occipital 01
CRÁNEO	Cráneo	Occipital 02
CRÁNEO	Cráneo	Temporal DER
CRÁNEO	Cráneo	Temporal IZ
CRÁNEO	Cráneo	Temporal IZ
CRÁNEO	Cráneo	Temporal IZ
CRÁNEO	Cráneo	Esfenoides
CRÁNEO	Cráneo	Etmoides
CRÁNEO	Cráneo	Cráneo completo
CARA	Cara	Maxilar sup DER
CARA	Cara	Maxilar sup IZ
CARA	Cara	Cigomático (Malar) DER
CARA	Cara	Cigomático (Malar) IZ
CARA	Cara	Nasal DER
CARA	Cara	Nasal IZ
CARA	Cara	Lagrimal (Unguis) DER
CARA	Cara	Lagrimal (Unguis) IZ
CARA	Cara	Palatino DER
CARA	Cara	Palatino IZ
CARA	Cara	Vómer
CARA	Cara	Mandíbula (Maxilar inf.) 01
CARA	Cara	Mandíbula (Maxilar inf.) 02
CARA	Cara	
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	1° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	1° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	2° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	2° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	3° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	3° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	4° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	4° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	5° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	5° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	6° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	6° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	7° costilla DER

CAJA TORÁCICA	Costillas verdaderas	7° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas falsas	8° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas falsas	8° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas falsas	9° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas falsas	9° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas falsas	10° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas falsas	10° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas flotantes	11° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas flotantes	11° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Costillas flotantes	12 ° costilla DER
CAJA TORÁCICA	Costillas flotantes	12 ° costilla IZ
CAJA TORÁCICA	Caja torácica	Esternón 01
CAJA TORÁCICA	Caja torácica	Esternón 02
CAJA TORÁCICA	Caja torácica	Esternón 03
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras cervicales	1°
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras cervicales	2°
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras cervicales	3°
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras cervicales	4°
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras cervicales	5°
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras cervicales	6°
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras cervicales	7°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	1°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	2°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	3°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	4°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	5°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	6°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	7°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	8°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	9°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	10°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	11°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras torácicas	12°

Biblioteca Digital 3D de Huesos Humanos

VERTEBRAL		
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras lumbares	1°
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras lumbares	2°
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras lumbares	3°
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras lumbares	4°
COLUMNA VERTEBRAL	Vértebras lumbares	5°
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras pelvianas	sacro
COLUMNA VERTEBRAL	Vertebras pelvianas	cóccix
MIEMBRO SUPERIOR	Cintura escapular	Clavícula DER
MIEMBRO SUPERIOR	Cintura escapular	Clavícula DER
MIEMBRO SUPERIOR	Cintura escapular	Clavícula IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Cintura escapular	Clavícula IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Cintura escapular	Escapula DER
MIEMBRO SUPERIOR	Cintura escapular	Escapula IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Hueso del brazo	Humero DER
MIEMBRO SUPERIOR	Hueso del brazo	Humero IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Hueso del antebrazo	Radio DER
MIEMBRO SUPERIOR	Hueso del antebrazo	Radio IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Hueso del antebrazo	Cubito (Ulna) DER
MIEMBRO SUPERIOR	Hueso del antebrazo	Cubito (Ulna) IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Escafoides DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Semilunar DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Piramidal DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Pisiforme DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Trapecio DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Trapezoide DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Grande DER

Biblioteca Digital 3D de Huesos Humanos

MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Ganchoso DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Escafoides IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Semilunar IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Piramidal IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Pisiforme IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Trapecio IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Trapezoide IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Grande IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del carpo	Ganchoso IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del metacarpo	1° metacarpiano DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del metacarpo	1° metacarpiano IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del metacarpo	2° metacarpiano DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del metacarpo	2° metacarpiano IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del metacarpo	3° metacarpiano DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del metacarpo	3° metacarpiano IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del metacarpo	4° metacarpiano DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del metacarpo	4° metacarpiano IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del metacarpo	5° metacarpiano DER
MIEMBRO SUPERIOR	Huesos del metacarpo	5° metacarpiano IZ
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 1 mano iz	1
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 1 mano iz	2
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 1 mano der	1
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 1 mano der	2
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 2 mano iz	1
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 2 mano iz	2
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 2 mano iz	3
MIEMBRO	Falange dedo 2 mano	1

Biblioteca Digital 3D de Huesos Humanos

SUPERIOR	der	
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 2 mano der	2
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 2 pie der	3
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 3 mano iz	1
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 3 mano iz	2
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 3 mano iz	3
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 3 mano der	1
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 3 mano der	2
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 3 mano der	3
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 4 mano iz	1
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 4 mano iz	2
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 4 mano iz	3
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 4 mano der	1
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 4 mano der	2
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 4 mano der	3
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 5 mano iz	1
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 5 mano iz	2
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 5 mano iz	3
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 5 mano der	1
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 5 mano der	2
MIEMBRO SUPERIOR	Falange dedo 5 mano der	3
MIEMBRO INFERIOR	Cintura pélvica	Coxal DER
MIEMBRO INFERIOR	Cintura pélvica	Coxal IZ
MIEMBRO INFERIOR	Huesos de la parte libre del MI	Fémur DER
MIEMBRO INFERIOR	Huesos de la parte libre del MI	Fémur IZ
MIEMBRO INFERIOR	Huesos de la parte libre del MI	Rotula (Patella) DER
MIEMBRO INFERIOR	Huesos de la parte libre del MI	Rotula (Patella) IZ

Biblioteca Digital 3D de Huesos Humanos

MIEMBRO INFERIOR	Huesos de la parte libre del MI	Tibia DER
MIEMBRO INFERIOR	Huesos de la parte libre del MI	Tibia IZ
MIEMBRO INFERIOR	Huesos de la parte libre del MI	Peroné (Fíbula) DER
MIEMBRO INFERIOR	Huesos de la parte libre del MI	Peroné (Fíbula) IZ
MIEMBRO INFERIOR	Huesos de la parte libre del MI	Tibia y Peroné IZ
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Astrágalo DER 01
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Astrágalo DER 02
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Astrágalo DER 03
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Astrágalo IZ 01
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Astrágalo IZ 02
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Calcáneo DER 01
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Calcáneo DER 03
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Calcáneo IZ 01
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Calcáneo IZ 02
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Calcáneo IZ 03
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Cuboides DER 01
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Cuboides DER 02
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Cuboides IZ 01
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Cuboides IZ 02
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Navícula (Escafoides) DER 01
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Navícula (Escafoides) DER 02
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Navícula (Escafoides) IZ
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Navícula (Escafoides) IZ
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Escafoides con cuñas IZ
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Cuneiforme intermedio DER
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Cuneiforme intermedio IZ
MIEMBRO	Tarso	Cuneiforme intermedio

Biblioteca Digital 3D de Huesos Humanos

INFERIOR		IZ
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	Cuneiforme lateral DER
MIEMBRO INFERIOR	Tarso	No identificado
MIEMBRO INFERIOR	Metatarso	1° metatarsiano DER
MIEMBRO INFERIOR	Metatarso	1° metatarsiano IZ
MIEMBRO INFERIOR	Metatarso	2° metatarsiano DER
MIEMBRO INFERIOR	Metatarso	2° metatarsiano IZ
MIEMBRO INFERIOR	Metatarso	3° metatarsiano DER
MIEMBRO INFERIOR	Metatarso	3° metatarsiano IZ
MIEMBRO INFERIOR	Metatarso	4° metatarsiano DER
MIEMBRO INFERIOR	Metatarso	4° metatarsiano IZ
MIEMBRO INFERIOR	Metatarso	5° metatarsiano DER
MIEMBRO INFERIOR	Metatarso	5° metatarsiano IZ
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 1 pie iz	1
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 1 pie iz	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 1 pie der	1
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 1 pie der	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 2 pie iz	1
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 2 pie iz	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 2 pie iz	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 2 pie der	1
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 2 pie der	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 2 pie der	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 3 pie iz	1
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 3 pie iz	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 3 pie iz	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 3 pie der	1

MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 3 pie der	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 3 pie der	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 4 pie iz	1
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 4 pie iz	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 4 pie iz	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 4 pie der	1
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 4 pie der	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 4 pie der	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 5 pie iz	1
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 5 pie iz	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 5 pie iz	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 5 pie der	1
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 5 pie der	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange dedo 5 pie der	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange medial	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange medial	2
MIEMBRO INFERIOR	Falange Distal	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange Distal	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange Distal	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange Distal	3
MIEMBRO INFERIOR	Falange	

La notación usada para las falanges tanto de manos como de pies es la siguiente:

- 1 para falanges proximales
- 2 para falanges mediales
- 3 para falanges distales