

Artículos

Imágenes no destructivas de Rayos X: microtomografías y reconstrucciones tridimensionales

Germán Tirao

Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba

Instituto de Física Enrique Gaviola - CONICET

Los avances tecnológicos en tomografías y microtomografías de rayos X han revolucionado la investigación en diferentes áreas disciplinares. En el ámbito de las investigaciones en Biología y más recientemente en Geología estas técnicas se están convirtiendo en el principal método para visualizar y describir estructuras en diferentes tipos de muestras con gran detalle y precisión. En este artículo se describe en que consiste la técnica, sus diferentes aplicaciones y sobre el equipo de desarrollo íntegramente local con el que cuenta la Facultad de Matemática, Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba, al servicio del sistema científico y tecnológico del país.

¿QUE ES UNA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA?

Supongamos que fotografiamos un objeto, la imagen obtenida nos muestra solo un lado del mismo, sin poder visualizar el otro pero, si fotografiamos el objeto desde muchos lados (ángulos), podremos obtener una visión completa de todo el volumen del objeto. Ahora, si la imagen es obtenida por rayos X, es decir que el objeto es irradiado y atravesado por este tipo de rayos; los rayos que atraviesan el objeto son proyectados en una placa en donde las partes internas del mismo que no son visibles se revelan en diferentes tonos de obteniéndose una radiografía.

Una radiografía revela la distribución bidimensional (2D) de las estructuras internas del objeto, es decir según su alto y ancho pero no nos permite conocer la distribución en profundidad de esas estructuras. Sin embargo, si tomamos muchas radiografías desde distintos ángulos (proyecciones), por medio de algoritmos matemáticos (es decir, un conjunto de operaciones que permiten hacer un cálculo) podremos reconstruir el volumen en tres

dimensiones (3D) de las estructuras internas y la distribución de sus densidades. Esta propiedad de un objeto, que se obtiene al usar rayos X, es en lo que se basa la técnica de tomografías computadas (TC) por rayos X.

Básicamente, un equipo tomográfico, consiste en (Fig. 1): 1) una fuente emisora de rayos X, la que puede tener diferentes características en cuanto al mecanismo y los materiales que emiten los rayos que atravesarán el objeto a analizar, 2) camilla (en tomógrafos hospitalarios) o mesa giratoria (en tomógrafos para investigación), y 3) detectores de la radiación los cuales registran los rayos X que logran atravesar la muestra luego de interactuar con ella como una proyección. Cuando los rayos X salen del objeto, son captados por los detectores y transmitidos a una computadora de control. Luego, con las proyecciones obtenidas, se aplican los diferentes algoritmos matemáticos necesarios que permiten obtener la distribución de densidades de las diferentes estructuras internas del objeto, y posteriormente se trabaja con software que permiten realizar la representación/visualización tridimensional del objeto.

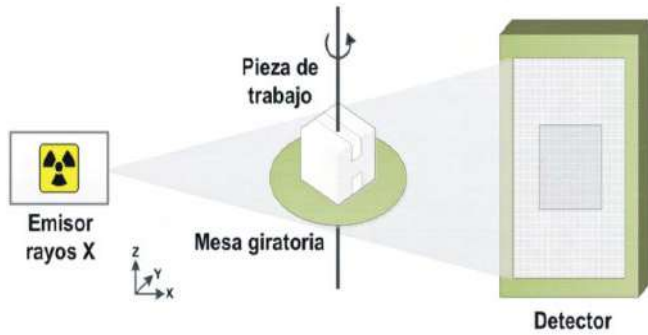


Figura 1: Esquema de un equipo tomográfico de rayos X de investigación (izquierda) y fotografía de un tomógrafo típico hospitalario (derecha).

La tomografía computarizada (TC) fue desarrollada en 1972 por el ingeniero electrónico Godfrey Newbold Hounsfield quien logró con esta nueva técnica superar las tres grandes limitaciones de la radiografía convencional por rayos X: 1) la imposibilidad de mostrar la información tridimensional en una imagen radiológica bidimensional; 2) la limitada capacidad para distinguir tejidos blandos y; 3) la dificultad de cuantificar las diferentes densidades de los tejidos. Si bien las primeras imágenes de tomografía reconstruidas con el primer escáner desarrollado en los Laboratorios EMI y comercializado en 1973 contaban con

una muy baja resolución espacial (es decir el nivel de detalle de las imágenes obtenidas) y tardaba nueve horas en total para obtener todas las imágenes angulares de un cerebro humano por ejemplo (Fig. 2), la técnica de tomografía representó una revolución en el campo de la radiología (análisis por rayos X), principalmente aplicado al diagnóstico por imágenes en Medicina. En la Figura 2 puede observarse una imagen obtenida en los equipos tomográficos actuales, donde claramente se ven los avances en calidad, resolución y detalles estructurales que facilitan el diagnóstico médico.

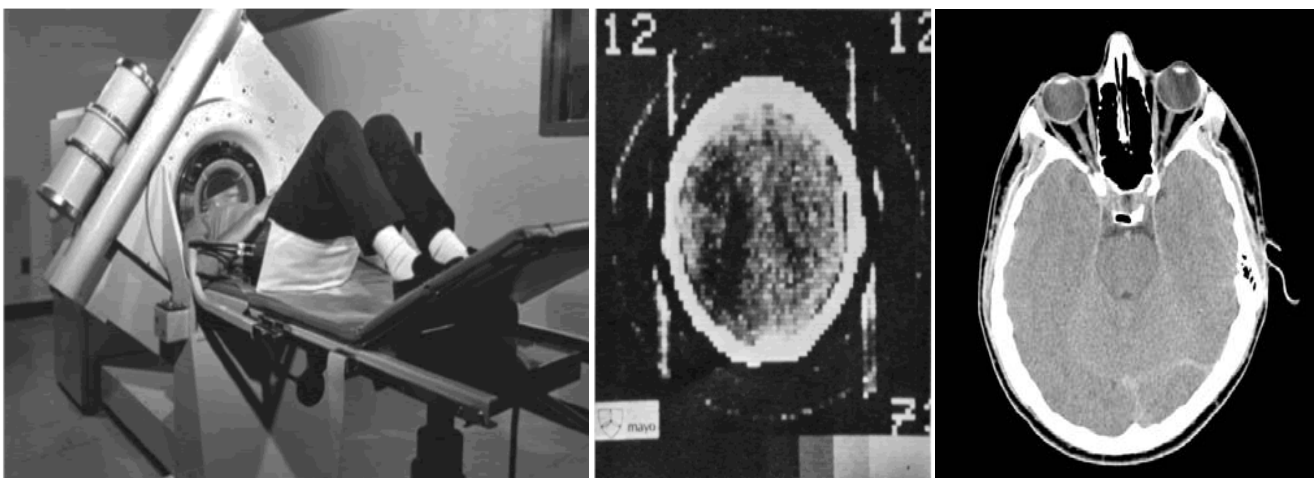


Figura 2: Paciente ubicado en un tomógrafo EMI Mark 1 (izquierda) y corte tomográfico del cerebro del paciente (centro). Fotos cortesía Mayo Clinic, Rochester-MN, EEUU. Corte tomográfico actual de un cerebro (derecha).

DESARROLLOS TECNOLÓGICOS, EQUIPOS Y APLICACIONES

A partir de 1980, se desarrollaron innovaciones en el campo de las tomografías computarizadas que permitieron mejorar parámetros fundamentales para el diagnóstico por imágenes como por ejemplo: una mayor velocidad de adquisición de las proyecciones o resolución temporal, lo que implicaba menor tiempo de exposición a la radiación de los pacientes; aumentar la calidad de la imagen es decir mejorar la resolución espacial y minimizar las dosis de radiación ionizante. Mejoras en cada uno de los componentes del tomógrafo (por ejemplo las fuentes emisoras de rayos X o los detectores de la radiación emitida por el objeto) y el desarrollo de software cada vez más especializados y complejos en técnicas de reconstrucción de la imagen, aportaron significativamente a la mejora de cada uno de los parámetros expuestos (Fig. 3). Así, se desarrollaron la tomografía en espiral o helicoidal

que se caracteriza porque no hay un movimiento continuo de la camilla ya que es el que rota es el gantry (parte del tomógrafo en continua rotación que contiene tanto al tubo emisor de rayos X como los detectores de radiación). Los tomógrafos denominados multi-tajadas o multi-detectores se caracterizan por tener varias líneas de detectores de la radiación que permiten recoger datos correspondientes a varias proyecciones simultáneamente y por lo tanto reducen el número de rotaciones del tubo de rayos X necesaria para cubrir una región anatómica específica, mejorando así la resolución temporal.

También, avances muy recientes incluyen la tomografía de doble fuente de rayos X que permiten tiempos de adquisición de imágenes cada vez más cortos, en hasta 83 milisegundos por proyección, con lo cual es posible tomar imágenes de estructuras anatómicas que se encuentran en constante movimiento como un corazón, logrando altos niveles de detalles de las arterias coronarias, las válvulas cardíacas y el músculo cardíaco, de gran valor clínico.

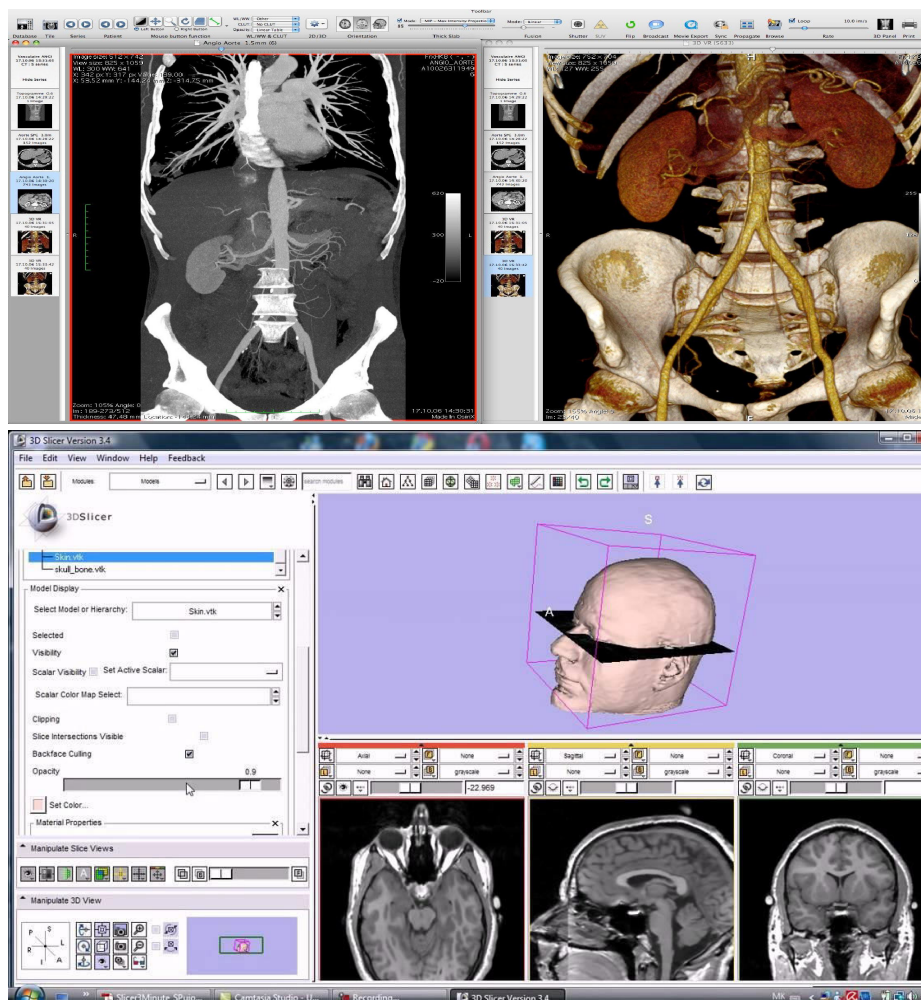


Figura 3: Captura de pantallas de dos softwares de visualización y manipulación de tomografías de rayos X: Osirix (arriba) y 3DSlicer (abajo).



Todos estos desarrollos tecnológicos son constantemente impulsados por la Medicina y el área del diagnóstico por imágenes. En la actualidad, el uso de esta técnica y sus continuas innovaciones ha sido adoptada por el campo de la investigación para el desarrollo de estudios en diferentes áreas disciplinares, en particular porque su aplicación, respecto a otras técnicas para la obtención de datos y particularmente para la reconstrucción tridimensional de diferentes tipos de muestras (biológicas y no biológicas), no implica su destrucción.

Los avances tecnológicos en el ámbito de la investigación han tenido objetivos levemente diferentes como: aumentar la resolución espacial para mejorar la calidad de la imagen ya que en este ámbito, la velocidad y la dosis de radiación no son parámetros limitantes ya que no se trabaja con pacientes que se pueden ver afectados por las dosis y el tiempo de exposición a la radiación, sino de muestras de diversa naturaleza como especímenes biológicos fijados para fines científicos, rocas, fósiles, piezas dentarias, autopartes, distintos materiales como polímeros, entre otras.

A diferencia de los tomógrafos utilizados en medicina, en donde lo que rota es el emisor de rayos X y el detector, en los tomógrafos desarrollados para investigación, generalmente lo que se mueve es la muestra, la cual rota alrededor de un eje central (Fig.1). El funcionamiento es simple y similar al tomógrafo hospitalario, para cada posición angular de la muestra se realiza una radiografía convencional en 2D o proyección, en donde los diferentes tejidos o estructuras se revelan en diferentes escalas de grises y donde cada gris representa una densidad diferente (es decir un tipo diferente de tejido o material); luego aplicando los algoritmos matemáticos sobre las proyecciones adquiridas, se reconstruye la distribución espacial de las diferentes densidades.

En este ámbito, el desarrollo de la microtomografía computarizada, ha permitido la formación de imágenes de rayos X en 3D mediante el mismo método utilizado en exploraciones de TC convencional, pero a pequeña escala, es decir que trabaja con muestras pequeñas y con una resolución de las imágenes muy superior. Permite, formar imágenes de estructuras internas y externas de objetos muy pequeños o finos, llegándose a representar una imagen microscópica en 3D y de manera no destructiva. Este detalle no es menor dado que la aplicación de esta técnica permite conservar la muestra, que en algunos casos suele ser escasa o única (cómo es el caso de los fósiles) o porque puede ser utilizadas para otro tipo de análisis.

Mientras que un equipo de TC convencional permite escanear objetos o muestras de gran tamaño, la resolución espacial, es decir el tamaño mínimo de una estructura que puede ser detectada en cada proyección, está entre 0,5 - 1 mm, aproximadamente, los equipos de microtomografía permiten obtener imágenes de mayor resolución de muestras que generalmente varían de 5 a 300 mm de tamaño, con resoluciones espaciales variables de 300 a 5 μm . Algunos equipamientos de última generación alcanzan resoluciones de 60 nanómetros (la doble hélice de ADN tiene un diámetro de aproximadamente 2 nanómetros; un microscopio óptico alcanza unos 200 nanómetros de resolución). Los últimos avances tecnológicos en microtomografías de rayos X involucran la radiación de sincrotrón (la emisión de rayos X se obtiene por aceleración de electrones) la que permite lograr una resolución espacial de submicrones obteniéndose imágenes de alto contraste y de manera rápida, en muestras donde las densidades son muy similares. Si bien la TC convencional todavía es utilizada para el análisis de objetos o muestras más grandes, la microtomografía con rayos X ha permitido a los investigadores obtener información detallada de una amplia gama de muestras en cuanto a su tamaño y naturaleza.

El desarrollo de las técnicas de tomografías y microtomografías computarizadas, abrió una nueva alternativa para las investigaciones en diferentes disciplinas respecto a otras técnicas como son la microscopía óptica y electrónica, permitiendo el análisis de diferentes tipos de muestras, de tamaños variables desde muy pequeños a muy grandes y la reconstrucción de sus estructuras internas sin destruirla. La creciente demanda de herramientas y equipamiento tecnológico que permitan a investigadores y técnicos la generación de conocimiento científico con un mayor y mejor grado de análisis a para su aplicación en diferentes ámbitos las hace imprescindibles para un mejor desarrollo de las investigaciones. Sin embargo, el costo de este tipo de equipamiento representa una limitante para su adquisición y su incorporación en laboratorios locales, por lo que en general se recurre a laboratorios de otros países para poder realizar este tipo de análisis.

EL MICROCT DEL LAMARX

Actualmente, el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X (LAMARX), con sede en la Facultad de Matemática Astronomía y Física (FAMAF) de la Universidad Nacional de Córdoba, cuenta con un equipo de microtomografías computarizadas cuyo desarrollo ha sido íntegramente llevado a cabo en el país.

Primero como físico y después también ya como profesor de FAMAF e investigador del CONICET, siempre me interesé por el desarrollo de tecnologías. La idea de diseñar y construir un microtomógrafo de rayos X, fue producto de la necesidad de contar con equipos de este tipo por su utilidad en el desarrollo de nuevas investigaciones en el país. Fue fundamental el apoyo financiero de diferentes entidades públicas de promoción científica y tecnológica como son el CONICET, la ANPCYT y la SECYT, y de instituciones educativas como el FAMAF en cuanto a personal de apoyo involucrado en el taller mecánico de precisión y el taller de electrónica. El proyecto se inició en el año 2007 y demandó 1 año entero de trabajo

y a partir del año 2008 el equipo está en funcionamiento de manera continua.

El diseño del microtomógrafo giró en torno a una fuente disponible de rayos X. Esta fuente es una fuente convencional de rayos X (la misma que se utiliza para radiografías convencionales) que permite trabajar con las configuraciones típicas (tamaño de la fuente emisora y material que genera los rayos X). Este equipo permite conformar el haz de rayos X que van a incidir en la muestra según los requerimientos del experimento a realizarse (tamaño, foco específico a una zona, naturaleza del material, etc.). Por ello este equipo tiene gran versatilidad para analizar diferentes tipos de muestras, realiza el escaneado tridimensional no destructivo y no invasivo con una buena resolución espacial de muestras de gran volumen en relación a otros microtomógrafos. El Micro-CT trabaja con muestras de hasta 1000 cm³ de volumen y posee una resolución espacial de alrededor de 150 micrones lo que facilita un análisis preciso de diferentes tipos de muestras que poseen muy diferentes propiedades físicas como densidad, absorción o dispersión para el estudio de su morfología (Cuadro 1).

Los datos técnicos de la instalación principal del Micro-CT son:

- Detector plano de rayos X de alta resolución (Varian - PaxScan 2020+).
- Electromecánica de alta precisión dedicada y dispositivo de control.
- Campo de visión: 200 mm x 200 mm.
- Espesor: 7 cm² / g equivalente (aprox.).
- Área de imagen: 200 mm x 200 mm.
- Resolución espacial: ~150 micrones.
- Homogeneidad del haz en el área de exploración máxima: 99.5%.
- Alto rango de eficiencia de detección de fotones: 10-150 keV.
- Software de alto rendimiento para análisis de imágenes, reconstrucción de tomografía y cuantificación de características.

Equipamiento informático de control y soporte

- PC de escritorio Intel® Core™ i3-2100 CPU @ 3.10 GHz Memoria (RAM) 8.00GB.
- Sistema operativo Windows 10 64 bits.
- Software de control desarrollado en C++.
- Software de procesamiento de reconstrucción 3D desarrollado en Matlab 2008.
- Software de visualización 3DSlicer, ImageJ.
- Software de visualización y análisis: 3DSlicer, ImageJ, desarrollos específicos en Matlab.



Vista externa e interna del MicroCT del LAMARX

Entre los análisis llevados a cabo a por el equipo de Micro-CT del LAMARX, se han procesado muestras como rocas, fósiles, muestras biológicas diversas, piezas dentarias y alimentos para su aplicación en diversas disciplinas como Geología, Paleontología, Biología,

Ingeniería, Química, Odontología, en metalurgia, etc. Las reconstrucciones tridimensionales obtenidas a partir de las microtomografías tienen aplicaciones varias en relación al tipo de muestra y al campo en el que se aplique la información obtenida (Fig. 3).

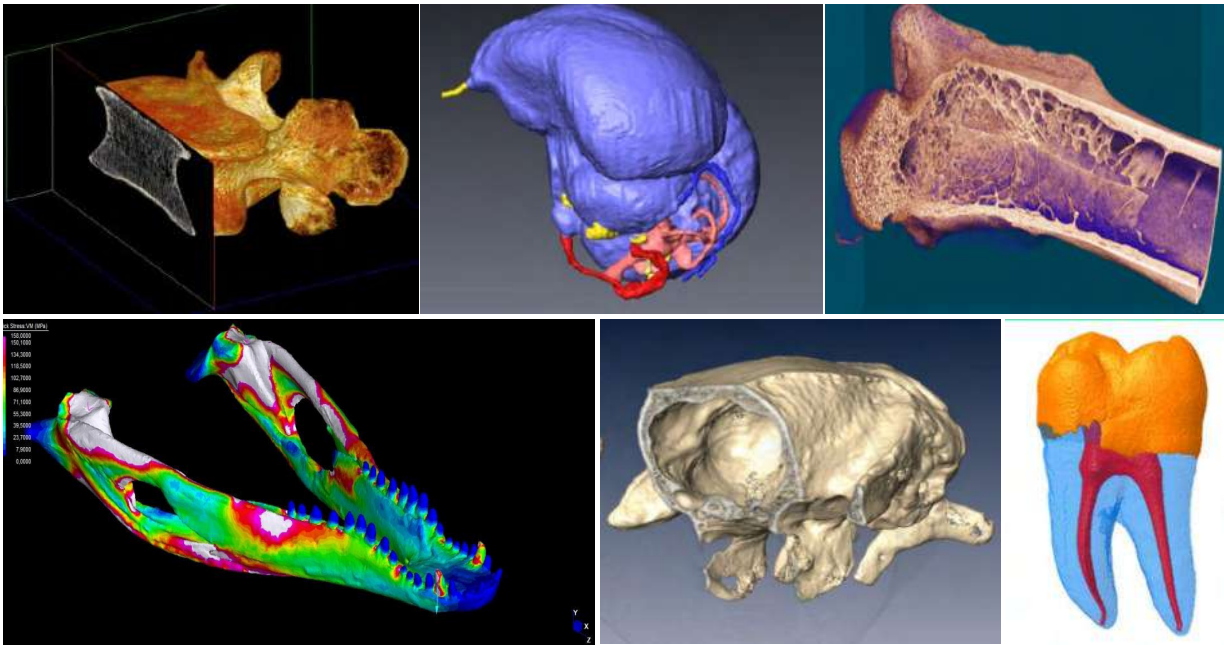


Figura 4: Diferentes visualizaciones obtenidas para el estudio de estructuras internas, morfología, parámetros biomecánicos, etc.

En biología y paleontología por ejemplo, se logra la reconstrucción de organismos completos que permiten determinar e identificar estructuras internas como esqueletos completos, forámenes, inserciones tendinosas y musculares y cuando la muestra lo permite vísceras, vasos y otras estructuras blandas, también permite determinar parámetros biomecánicos relacionados a distintos tipos de tejidos como su resistencia, fuerza o elasticidad (Figura 4). También en el área de la odontología y particularmente en la endodoncia, la visualización de la anatomía radicular de piezas dentarias de sus conductos y sus estados patológicos en forma volumétrica (3D) es una herramienta que permite obtener información de alta eficiencia diagnóstica.

En relación a muestras no biológicas, permite por ejemplo revelar detalles de la estructura interna como los poros de rocas de yacimientos gasíferos y comprender mejor las condiciones que afectan la producción del yacimiento. En el ámbito de la industria, esta técnica permite el control de calidad de manera no-destructiva brindando información tanto de la medición de estructuras internas con imágenes de alta resolución y al mismo tiempo mediciones dimensionales de alta precisión. Con el uso de esta técnica se inspecciona el control de

calidad industrial de piezas fabricadas con plásticos, polímeros, cerámicos, materiales de fundición y metales ligeros (aluminio por ejemplo), impresiones 3D, fibras y piezas ensambladas de la industria automotriz, aeroespacial y aeronáutica, médica y biomédica, y electrónica.

El equipo del LAMARX realiza el estudio y caracterización de materiales de diversa naturaleza y con las más variadas finalidades lo que ha facilitado el trabajo de científicos de todo el país ya que evita el envío de material al exterior lo que acelera los procesos de obtención de datos y disminuye costos. El grupo responsable del laboratorio reúne físicos, químicos, geólogos, biólogos, odontólogos, arqueólogos, etc., abarcando una amplia gama de disciplinas y temas de trabajo y se presta servicio a variados institutos de investigación del CONICET, Universidades Nacionales e Internacionales, como así también al sector privado.

Ante la disponibilidad de un equipo local que les permite incorporar el uso de microtomografías para el análisis de diversas muestras en sus investigaciones, durante el mes de agosto del año pasado algunos miembros del IBIGEO realizaron una capacitación bajo mi orientación en donde se abordaron algunos principios básicos de la técnica de microtomografías por rayos X, como la adquisición de imágenes, su procesamiento y su visualización en 3D.

A

En particular la capacitación estuvo orientada al entrenamiento en el uso de software libres (ImageJ, 3DSlicer), que con herramientas alternativas permiten diferentes tipos de procesamientos de las imágenes tomográficas y/o visualizaciones en 3D, dependiendo de las necesidades o requerimientos de cada análisis (Fig. 5).

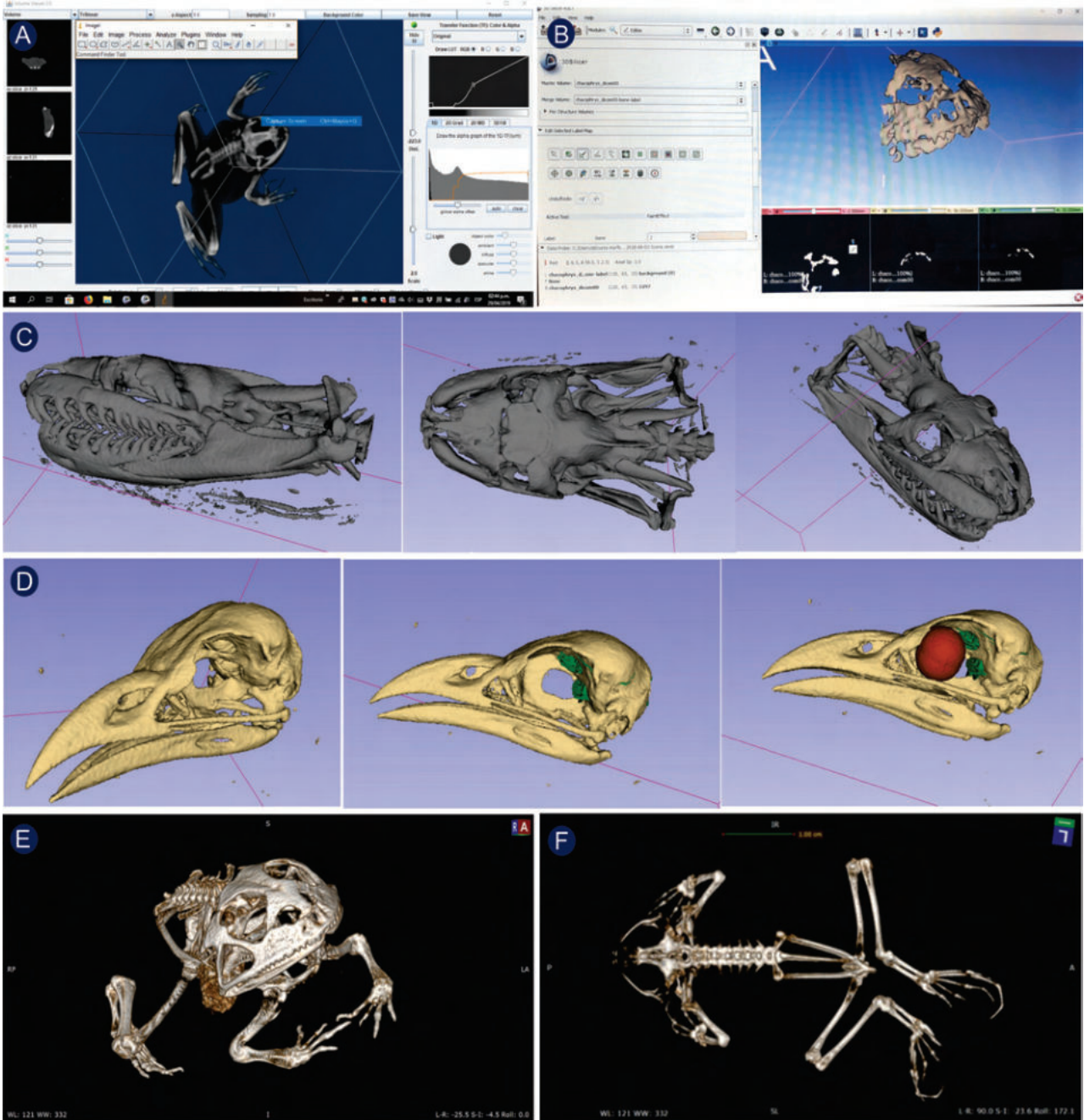


Figura 5. Resultados de la capacitación llevada a cabo por miembros del IBIGEO. Los software utilizados, ImageJ (A) y 3D Slicer (B) permiten el procesamiento de las imágenes con distintos objetivos. Con ImageJ, es posible reconstruir el volumen del objeto o tomografiado modificando algunos parámetros para una mejor visualización. El 3D Slicer, permite identificar y segmentar (etiquetar con diferentes colores) estructuras las cuales se distinguen como diferentes tonos de gris en el volumen virtual. C. Diferentes vistas de la reconstrucción del volumen del cráneo de una serpiente, anaconda amarilla, luego de la segmentación en la secuencia de cortes tomográficos de los huesos del cráneo (imágenes de L. Díaz Fernández). D. Reconstrucción del cráneo de un pájaro carpintero, en la secuencia se puede observar como las diferentes estructuras pueden ser etiquetadas de manera independiente con el programa y reconstruirlas en un modelo 3D de manera conjunta o individual. E y F. Segmentación de esqueletos completos de dos especies de ranas obtenidos luego del trabajo con el programa 3D Slicer. E. Especimen de escuerzo de las salinas (Imagen de M. Fabrezi). E. Especimen de ranita llorona (Imagen de M. Chuliver Pereyra).

Para conocer más...



Para obtener más información acerca del microtomografo del LAMARX y/o para asesoramiento técnico se puede acceder a la web del laboratorio (lamarx.famaf.unc.edu.ar/). Además, la gestión de turnos para el servicio se realiza a través del sitio web del Sistema Nacional de Microscopia (<http://turnos.microscopia.mincyt.gob.ar/sistema/externo/login.php>) en donde además de los servicios del MicroCT se encuentran disponibles todos los otros servicios tecnológicos del LAMARX (Microscopia Electrónica, Microscopia Confocal, Microanálisis con Sonda de Electrones).

En la actualidad existen varios sitios web en donde se publicitan diferentes software (pagos y gratuitos) para el análisis de imágenes tomográficas como así también bases de datos que cuentan con reconstrucciones tridimensionales de diferentes tipos de muestras que son de acceso libre, algunos ejemplos son:

<https://www.morphosource.org/>

<https://all3dp.com/es/1/mejores-programas-diseno-3d-gratis-modelado-3d/>