

Ignacio Alejandro Cerda
Universidad Nacional de Río Negro

Mirando gigantes con lupa

La importancia de la paleohistología para el estudio de los dinosaurios

En los restos fósiles de vertebrados queda por lo general preservada intacta la estructura microscópica de los huesos u otras partes duras del animal, lo cual significa que su estudio puede proporcionar una enorme cantidad de información sobre la biología de especies que se extinguieron hace millones de años. La paleohistología describe e interpreta la estructura microscópica de los tejidos fosilizados, y si bien tuvo tradicionalmente un cometido secundario en la paleontología de vertebrados, eso se revirtió en las dos últimas décadas, en buena parte, gracias a estudios de tejidos de dinosaurios orientados a esclarecer la fisiología de ese grupo de reptiles.

El tejido óseo de vertebrados vivientes

Pese a su alto grado de mineralización, los tejidos óseos tienen una enorme actividad metabólica, producto del continuo intercambio de fluidos entre sus células y el torrente sanguíneo. La estructura de esos tejidos está ba-

¿DE QUÉ SE TRATA?

El estudio comparativo de la estructura microscópica de tejidos óseos de vertebrados actuales y de especies extinguidas que conocemos por fósiles de sus huesos proporciona indicios para inferir procesos y fenómenos biológicos de los segundos.

sada en una sustancia intercelular llamada *matriz ósea*, que tiene un componente orgánico, mayormente constituido por fibras de *colágeno*, y uno inorgánico, formado por cristales de fosfato de calcio conocidos como *hidroxiapatita*. Las fibras colágenas actúan como la armazón sobre la que se depositan dichos cristales. La matriz generalmente contiene células denominadas *osteocitos*, encerradas dentro de pequeños espacios conocidos por *lagunas* y comunicadas entre ellas mediante prolongaciones alojadas en diminutos conductos llamados *canalículos*. Esas prolongaciones permiten el intercambio de sustancias entre las células óseas y el sistema circulatorio.

Los vasos linfáticos y sanguíneos se alojan en canales del tejido óseo, los *canales vasculares*, unas pequeñas estructuras cilíndricas de unos 0,2mm de diámetro que también suelen albergar nervios. Si se produce destrucción y formación de nuevo tejido óseo, es decir, si tiene lugar un proceso de remodelación ósea, se forman estructuras cilíndricas llamadas *osteonas de Havers* (u *osteonas secundarias*), que contienen uno o más canales vasculares.

La organización e incluso la presencia de las mencionadas estructuras, típicas del tejido óseo, varían por efecto de diversos factores. Por ejemplo, se sabe que el grado de ordenamiento de las fibras colágenas es inversamente proporcional a la velocidad con que la matriz se formó. Algo similar ocurre con los canales vasculares, que son más abundantes y menos ordenados en matrices formadas de manera relativamente rápida. Dichas velocidades de formación de la matriz ósea están directamente relacionadas a las velocidades de crecimiento de los huesos que las contienen, lo que a su vez puede correlacionarse con el crecimiento del individuo.

La información anterior proviene principalmente de estudios de organismos vivientes de diversas especies, pues mayoritariamente el significado biológico de las estructuras microscópicas del tejido óseo no depende de los grupos de vertebrados que las exhiban. Por ello, sobre la base de los animales actuales se pueden inferir los procesos y fenómenos biológicos de vertebrados de los que solo conocemos fósiles (como los dinosaurios extinguidos).

¿Cuánto tiempo vivían? ¿Cómo crecían?

El conocimiento de la edad de los individuos es fundamental para analizar fenómenos biológicos como su maduración sexual, longevidad y tasa de crecimiento. Existen numerosos métodos para establecer la edad de animales vivientes que no pueden ser empleados en organismos fósiles, pero otros son aplicables tanto a estos

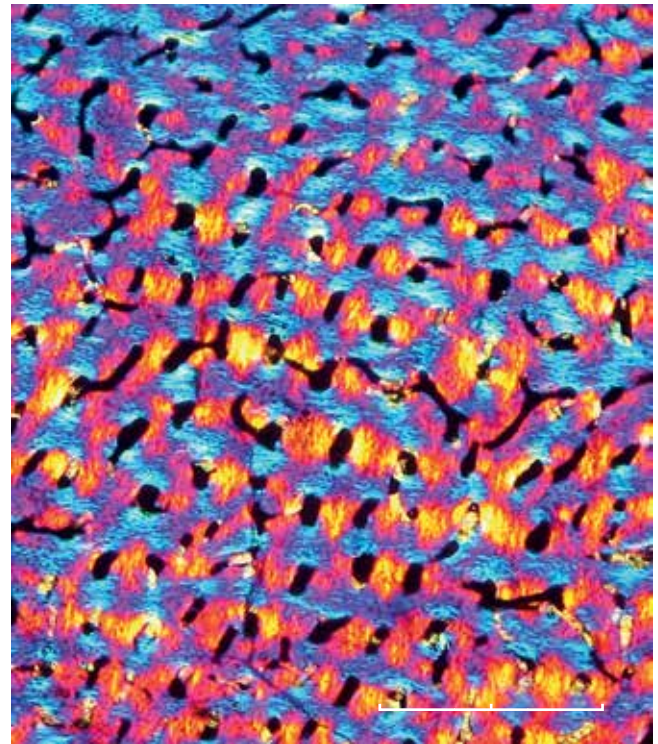


Figura 1. Microfotografía tomada con microscopio y luz polarizada de un corte de fémur fósil del pequeño dinosaurio ornitópodo herbívoro *Gasparinisaura cincosaltensis*, que habitó la Patagonia. Los distintos colores indican la orientación de las fibras de colágeno de la matriz del tejido óseo original: los manchones azules y anaranjados indican sectores en los cuales la dirección de las fibras resultó paralela al plano de corte; los sectores fucsias revelan que dicha dirección era allí perpendicular a ese plano. Las abundantes manchas oscuras, a veces ramificadas, indican los canales que contenían a los vasos sanguíneos y linfáticos. La barra que da la escala mide 1mm.

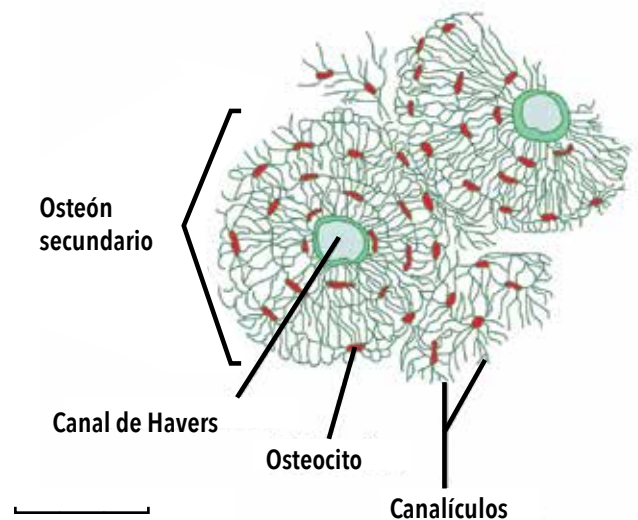


Figura 2. Esquema de un corte de hueso de adulto humano actual. Adaptado de *Gray's Anatomy of the Human Body*, 1918. Las células óseas u osteocitos están encerradas en reducidas cavidades o lagunas interconectadas por delgados conductos o canalículos. Estos permiten el intercambio de nutrientes y desechos con el sistema circulatorio, cuyos vasos sanguíneos y linfáticos corren dentro de los canales de Havers. En otros vertebrados, los patrones de la histología ósea pueden ser distintos. La barra que da la escala indica un décimo de milímetro.

como a aquellos, por ejemplo, contar las marcas de crecimiento que aparecen en sus huesos, que son formaciones del tejido óseo principalmente de dos tipos: anillos anuales o ánuos (técnicamente, *annuli*) y líneas de crecimiento detenido.

Esas marcas indican cambios del ritmo de formación de la matriz ósea, e incluso, las segundas, su interrupción total. Que aparezcan en los miembros de un individuo es señal de que el crecimiento de estos —y por extensión de todo el organismo— no fue constante. Comúnmente, las fluctuaciones del crecimiento están sincronizadas con los ciclos de las estaciones, lo que establece un ritmo anual que ha sido comprobado en grupos tan dispares como aves, mamíferos y los reptiles.

En los dinosaurios, la estimación de edad mediante estos métodos de *esqueletocronología* ha permitido inferir el momento en el cual ciertos grupos alcanzaban la maduración sexual, e incluso construir curvas de crecimiento. En la figura 4 se muestra la obtención de una curva de crecimiento de un pequeño dinosaurio ornitópedo a partir de un corte de la parte media de un hueso de uno de sus miembros posteriores, un fémur. El corte revela por lo menos cuatro marcas de crecimiento.

Con el incremento del tamaño de los huesos, aumenta el de la cavidad medular, lo que destruye las marcas dejadas por las etapas más tempranas, pero su número y posición pueden ser estimados, por ejemplo, extrapolando las características de las marcas preservadas o las de cortes de individuos de distintas edades. En la figura 4, las líneas estimadas desaparecidas con la expansión de la cavidad medular se indican en punteado. Además de ser utilizadas para determinar la edad del individuo, esas marcas brindan otra información. Así, la circunferencia de cada una de ellas indica el tamaño de la del hueso en ese momento, el cual permite, a su vez, inferir las dimensiones del animal para cada uno de sus años de vida, puesto que la circunferencia del fémur es-

Figura 3. Corte de un hueso fosilizado encontrado en la Patagonia. Corresponde a un miembro posterior de un dinosaurio saurópodomorfo herbívoro llamado *Mussaurus patagonicus*, que vivió en la Patagonia en el Triásico superior, hace unos 215Ma. Se advierte la excelente preservación de las estructuras histológicas, entre ellas ánuos, canales vasculares, líneas de crecimiento detenido, osteonas primarias y secundarias y lagunas de células óseas.

Ánulo

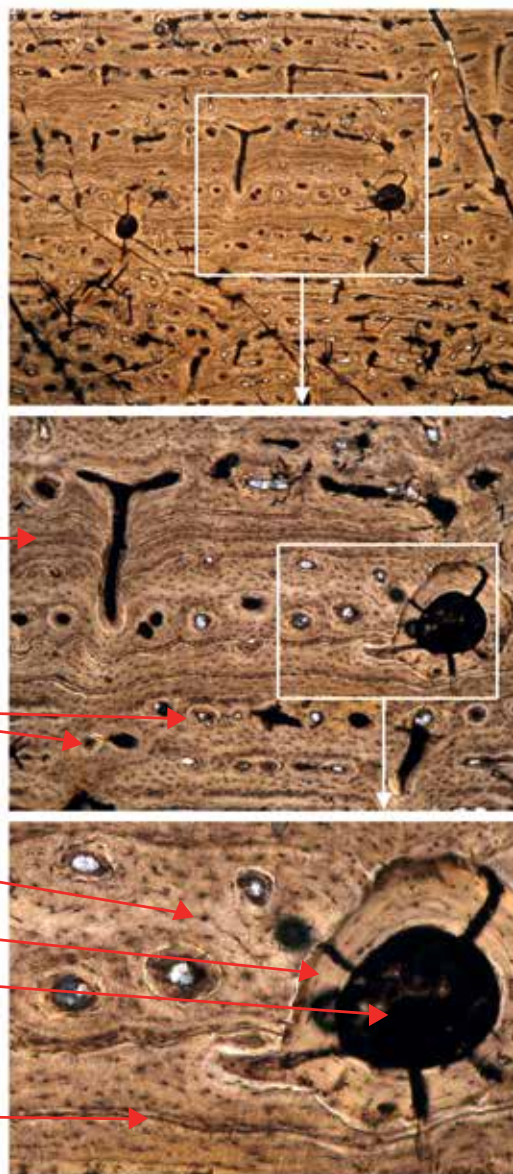
Osteonas primarias

Lagunas de células óseas

Osteona secundaria

Canal vascular

Líneas de crecimiento detenido



tá relacionada con la masa corporal, y que ese hueso soporta el peso del cuerpo. De esta manera es posible determinar de qué forma crecía el individuo. En el caso del ejemplo, se advierte un crecimiento de tipo exponencial, y que el dinosaurio murió en la etapa más acelerada de su desarrollo.

¿A qué edad morían?

A medida que cursan las sucesivas etapas de su vida —también denominadas *estadios ontogenéticos*— los dinosaurios suelen llamarse embriones, juveniles, subadultos y adultos. Es crucial para el estudio de los fósiles establecer en cuál de esos estadios se encontraba el animal cuando murió. Si bien el sentido común indica que

el primer parámetro a tener en cuenta es el tamaño del ejemplar, ello no se puede aplicar para un fósil de una especie nueva para la ciencia, pues la talla de un adulto (definido como un individuo que ha terminado de crecer) no es conocida. Por otra parte, en algunos grupos de vertebrados la talla es un parámetro poco útil porque no existe en ellos una correlación estricta entre tamaño y estadio ontogenético. A menudo se puede recurrir a características anatómicas como el grado de fusión de partes del esqueleto, por ejemplo, de los componentes de las vértebras. Si bien es un parámetro efectivo, no puede ser empleado para ejemplares de los cuales se dispone solo de algunos pocos huesos fosilizados.

Para despejar estas incógnitas, la paleohistología proporciona una excelente vía de conocimiento, puesto que la microestructura del tejido óseo experimenta una serie de importantes cambios durante el crecimiento de los individuos. Se han encontrado numerosos parámetros adecuados, entre ellos la densidad de canales vasculares, la distancia entre marcas sucesivas de crecimiento, el ordenamiento de las fibras colágenas y —el más utilizado para establecer que un animal había alcanzado la adul-

tez al morir— la formación de una *capa circunferencial externa* o *sistema fundamental externo*, una estructura compuesta por un tejido óseo mayormente carente de canales vasculares, con fibras colágenas altamente ordenadas y, por lo general, con una gran cantidad de marcas de crecimiento fuertemente agrupadas, como lo indica la figura 4.

Un buen ejemplo de la determinación de los estadios ontogenéticos mediante el uso de la paleohistología viene proporcionado por el dinosaurio *Europasaurus holgeri*, que vivió en el Jurásico superior hace unos 154Ma y del que se encontraron fósiles en lo que hoy es el norte de Alemania y en tiempos del animal era una isla. Integró el grupo de los saurópodos, caracterizados por ser enormes (fueron los vertebrados terrestres más grandes que habitaron el planeta), cuadrúpedos, herbívoros, de cuello muy largo y de cabeza reducida. Pero la masa corporal de los individuos de mayor tamaño de *E. holgeri* encontrados se estimó en 690kg, valor extraordinariamente reducido en comparación con las más de 20 toneladas que en promedio tenían los saurópodos. El análisis paleohistológico, sin embargo, reveló que los fósiles de ejemplares de mayor tamaño encontrados co-



Figura 4. Estimación de la edad y del ritmo de crecimiento de un dinosaurio de la especie *Gasparinisaura cincosaltensis*, cuyo esqueleto reconstruido se muestra en la parte superior izquierda de la figura. El animal medía unos 45cm de largo. Del fémur resaltado en rojo y ampliado en la imagen a la derecha de la anterior se obtuvo por corte una muestra cuyas características indica el esquema amarillo. En este se representan con cuatro líneas continuas las marcas de crecimiento subsistentes en el momento de la muerte del animal, y con tres líneas punteadas las marcas desaparecidas a causa del crecimiento. El número y la distribución de esas marcas permite obtener la curva de crecimiento que muestra el gráfico inferior, en el que el eje horizontal indica la edad del animal en años y el vertical su peso en kg.

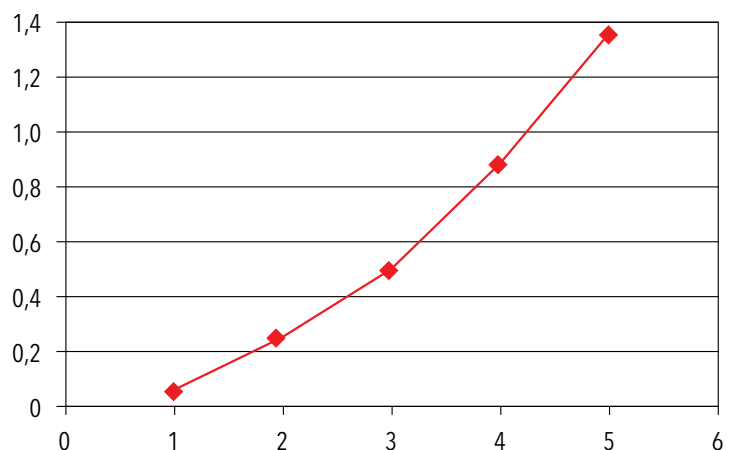
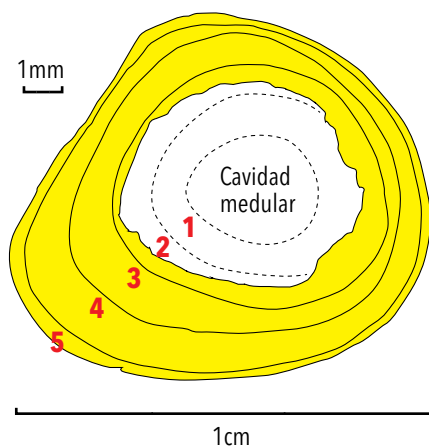
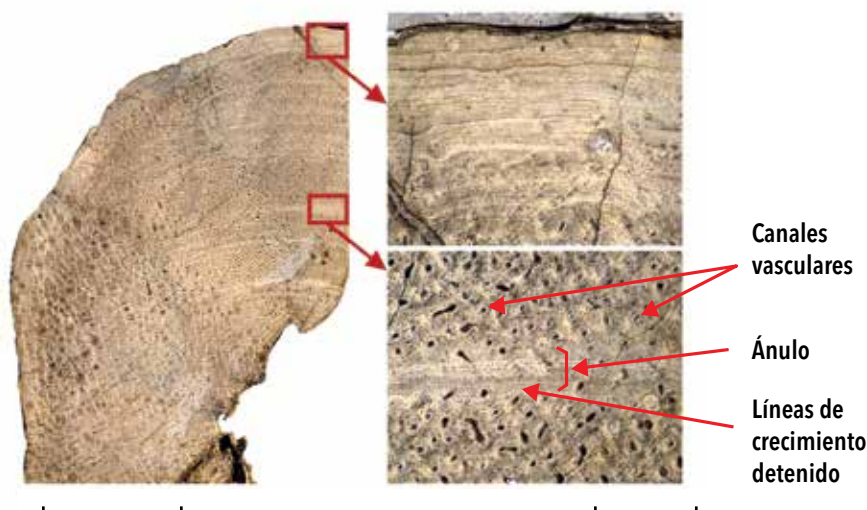




Figura 5. Microestructura del fémur de *Aucasaurus garridoi*, un dinosaurio terópodo bípedo cuyo esqueleto fósil se encontró en Neuquén en estratos del Cretácico superior, que datan de unos 83Ma atrás. Arriba, una réplica del esqueleto del animal montada en el museo Carmen Funes de Plaza Huinul. La especie medía unos 6m de longitud. Entre un fémur y la cola sobresale un hueso de la cadera llamado isquion. Abajo, a la izquierda, un sector de fémur y, a la derecha, microfotografías de cortes del fósil de ese hueso que revelan cómo fue su tejido. En la periferia del detalle superior se advierte gran cantidad de líneas de crecimiento agrupadas en un tejido pobremente irrigado, lo cual revela que al momento de morir se había detenido el crecimiento del individuo. El recuadro inferior muestra un ánulo asociado con una línea de crecimiento, indicación de una pausa estacional de este. El resto del tejido óseo exhibe gran cantidad de canales vasculares, claro indicio de un crecimiento activo durante el período en que se formó esa porción del hueso. Las barras que dan las escalas aproximadas miden respectivamente 2m (arriba), 5mm (izquierda) y 0,5mm (derecha).



rrespondían a adultos y no a juveniles como se podría pensar. Dicha extraordinaria reducción de tamaño corporal fue interpretada como resultado del aislamiento de la especie en una isla.

¿Cómo murieron algunos?

Las enfermedades que afectan el esqueleto de los vertebrados generan, comúnmente, modificaciones importantes en el aspecto de los huesos. Dichas modificaciones resultan útiles, junto con otras líneas de evidencia, para efectuar un diagnóstico de la enfermedad. A la par de las alteraciones anatómicas ocurren cambios histológicos, que

también pueden brindar información acerca de la enfermedad. Si bien los estudios de las enfermedades de vertebrados fósiles (llamados de *paleopatología*) datan de hace más de un siglo, la utilización de técnicas *paleohistológicas* en ellos es relativamente nueva, por lo menos para los dinosaurios.

Una enfermedad conocida como osteopetrosis aviana fue recientemente documentada en un dinosaurio sauropodomorfo sobre la base del estudio de fósiles hallados en la provincia de Santa Cruz. Visto con un microscopio, el corte de la porción media de uno de los fémures reveló un tejido poco usual dentro de la cavidad medular (figura 5). La patología, de origen viral, que se identificó por comparación con vertebrados vivientes, produce un engrosamiento anormal de la corteza del tejido compacto de los huesos de los miembros, así co-

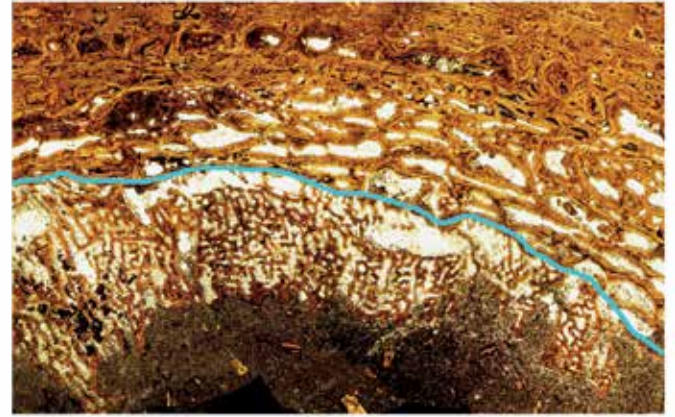


Figura 6. Hueso patológico de *Mussaurus patagonicus*. La figura de la izquierda es un corte transversal del fémur de un ejemplar adulto, en el cual el recuadro marca la presencia de tejido anómalo en el margen de la cavidad medular. En la figura de la derecha, que amplía dicho recuadro, se advierte que la microestructura del tejido normal (arriba de la línea celeste) difiere de la del anómalo (abajo de esa línea), consecuencia de padecer osteoporosis aviar. Las barras que dan la escala miden respectivamente 5cm (izquierda) y 5mm (derecha).

mo un crecimiento anómalo en la superficie externa de la cavidad medular y dentro de esta (a veces, solo en la cavidad medular).

¿Cómo se formaron sus huesos?

Muchos grupos de dinosaurios se caracterizan por tener rasgos como cuernos o crestas craneanas, así como llamativas placas y púas a lo largo del cuerpo. Quizá uno de las más célebres en la cultura popular sean las placas y púas de *Stegosaurus*, un dinosaurio herbívoro del hemisferio norte que vivió en el Jurásico superior, hace unos 150Ma y del que se han encontrado fósiles en el oeste norteamericano y en Portugal. Tanto las placas como las púas de *Stegosaurus* se corresponden con un grupo particular de estructuras óseas denominadas *osteodermos*, presentes en cocodrilos y armadillos, además de en diversos grupos de dinosaurios.

Corazas de ese tipo se han constatado en los titanosaurios, un grupo de dinosaurios saurópodos que vivieron en el Cretácico superior y cuyos primeros fósiles se encontraron en la India hacia fines de la década de 1870. Un integrante de ese grupo de dinosaurios acorazados fue descubierto en Salta hacia fines de la década de 1970 por José Bonaparte y sus colaboradores, quienes le dieron el nombre de *Saltasaurus loricatus*. El animal poseía por lo menos dos tipos diferentes de osteodermos: unos for-

mados por placas cónicas de alrededor de 10cm de largo, y otros consistentes en placas semiesféricas de diámetros inferiores a 1cm, denominadas *osículos dérmicos*. El estudio paleohistológico reveló que se trataba de porciones mineralizadas de la dermis. Así, los osteodermos formaban una capa gruesa pero a su vez flexible de tejido óseo bajo la piel, y posiblemente brindaban efectiva protección ante el ataque de predadores.

Consideraciones finales

Los ejemplos comentados conforman una pequeña muestra de las cuestiones que la paleohistología contribuye a dilucidar. Al mismo tiempo, la difusión de los estudios de paleohistología condujo indirectamente a la realización de investigaciones sobre histología ósea de vertebrados vivientes, muchas de las cuales se realizan con el propósito de esclarecer la biología de organismos de especies extinguidas.

Una de las dificultades históricas de la paleohistología reside en que, por el carácter destructivo de sus procedimientos tradicionales, que requieren hacer cortes de los fósiles, no es aceptable avanzar con las investigaciones de restos únicos o escasos. Un cambio importante que comienza a difundirse en esta materia es la posibilidad de obtener imágenes por procedimientos como las microtomografías computadas, que no solo conservan la integri-

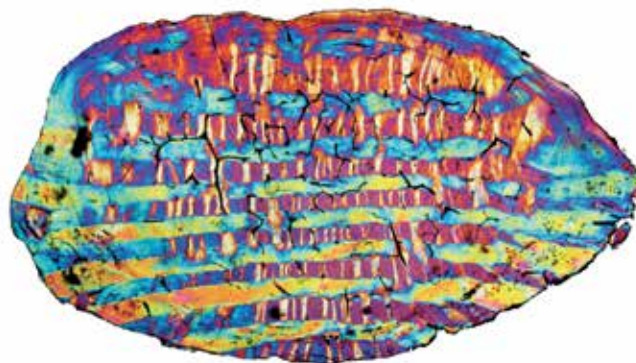


Figura 7. El dinosaurio acorazado *Saltasaurus loricatus*, un saurópodo herbívoro que vivió hace unos 70Ma en lo que hoy es el noroeste argentino (croquis superior), tenía la piel cubierta de formaciones óseas llamadas *osteodermos*, de los que la fotografía del centro, de restos fósiles, muestra un grupo de los más pequeños, denominados *osículos*. La imagen inferior es una microfotografía de un corte de uno de los osículos e indica que estaban formados por gruesos empaquetamientos de fibras colágenas mineralizadas orientadas en distintas direcciones, según lo indican las diferencias de color de la imagen. Las barras que dan la escala aproximada miden respectivamente 2m (arriba), 10cm (centro) y 3mm (abajo).



dad de los restos sino, también, permiten apreciar los tejidos en tres dimensiones, lo cual es muy ventajoso por comparación con los cortes de los especímenes, que muestran las estructuras microscópicas en dos dimensiones.

Pero por el momento las técnicas microtomográficas son de alto costo y solo aplicables al análisis de muestras de tamaño reducido, por lo que los procedimientos tradicionales de corte continúan siendo la mejor opción para los paleohistólogos, aunque se puede esperar que se registren avances que conduzcan a ampliar la posibilidad de la aplicación de las primeras y, con ellos, se extiendan los estudios histológicos de los vertebrados vivos y los paleohistológicos de dinosaurios y de otros grupos de vertebrados de especies extinguidas. **CH**



LECTURAS SUGERIDAS

CERDA IA & POWELL JE, 2010, 'Dermal armour histology of *Saltasaurus loricatus*, an Upper Cretaceous sauropod dinosaur from Northwest Argentina', *Acta Palaeontologica Polonica*, 55, 3: 389-398.

CERDA IA, CHINSAMY-TURAN A & POLD, 2014, 'Unusual endosteally formed bone tissue in a Patagonian basal sauropodomorph dinosaur', *The Anatomical Record*, 297: 1385-1391.

CHINSAMY-TURAN A, 2005, *The Microstructure of Dinosaur Bone*, Johns Hopkins University Press, Baltimore.

SANDER PM et al., 2006, 'Bone histology indicates insular dwarfism in a new Late Jurassic sauropod dinosaur', *Nature*, 441: 739-741.



Ignacio Alejandro Cerda

Doctor en biología, Universidad Nacional del Comahue.
Investigador adjunto del Conicet en el Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología, Universidad Nacional de Río Negro, y en el Museo Carlos Ameghino, Cipolletti.