

Isótopos estables:

una alternativa en los estudios de los mamíferos fósiles

Víctor Adrián **Pérez-Crespo**
Luis M. **Alva Valdivia**

Realmente apasionante es descubrir los restos fosilizados de un mamífero que vivió tal vez hace millones de años. Sin embargo, después de un intenso trabajo de colecta e identificación, preguntas como ¿qué comía y cuál era su hábitat?, esperan ser respondidas. Existen diversas formas de revelar lo anterior, siendo una de ellas el uso de isótopos estables.

La forma más tradicional de inferir la dieta y el hábitat de mamíferos extintos es observar y comparar los restos fosilizados, huesos y dientes, con los que se encuentran en los mamíferos actuales. Por ejemplo, si encontramos muelas que son de una especie de caballo que vivió en el Pleistoceno, y las comparamos con las que tienen los caballos y cebras actuales, podemos deducir que se alimentaba de pastos principalmente y que vivía en pastizales o sabanas (llanuras). Sin embargo, en ocasiones, aun cuando los dientes nos indiquen un tipo de dieta específico, ésta puede variar debido a factores como: la edad de los organismos (ya que en ocasiones los individuos juveniles se alimentan de un tipo de comida y los adultos de otra), factores geográficos como la altitud, la latitud y la longitud (dado que, a veces, poblaciones de la misma especie que viven en lugares distintos se alimentan de distintos recursos). Por lo anterior no es posible distinguir dichos cambios al tratar de inferir la dieta y el hábitat de un mamífero fósil usando sólo la morfología de sus huesos o dientes.

La alternativa para inferir la dieta y el hábitat es el análisis de coprolitos, que son heces fosilizadas. Su análisis permite determinar el tipo de comida que ingería el animal; sin embargo, estos restos son muy escasos y no se encuentran para todas las especies. Afortunadamente, el uso de técnicas basadas en isótopos estables resuelve estos problemas.

¿QUÉ SON LOS ISÓTOPOS ESTABLES?

Un isótopo es un elemento que tiene la misma masa atómica pero diferente número atómico, por ejemplo, el carbono, cuya masa atómica es seis, pero sus números atómicos pueden ser 12, 13 o 14.¹

Existen tres clases de isótopos: los radioactivos, los cuales se transforman de un elemento a otro, como el ⁴⁰K que se convierte en ⁴⁰Ar; los cosmogénico, los cuales se originan en las capas altas de la atmósfera debido al choque de rayos cósmicos con las moléculas de los elementos que se encuentran en la atmósfera; por ejemplo, las moléculas de carbono que se encuentran en las capas superiores de la atmósfera al ser bombardeadas por rayos cósmicos se convierten en ¹⁴C y esta molécula posteriormente se transforma en ¹⁴N; y los estables, los cuales no se transforman en otros elementos y se encuentran en casi todos los compuestos como son el ¹³C, ¹⁶O, etcétera.^{1,2} Otras características de los isótopos estables son: tener bajo peso molecular, poseer diferencias de masas relativamente grandes, corresponder a elementos que son muy abundantes en la naturaleza, presentar diver-

sos estados de oxidación, formar diversos tipos de enlaces químicos, y la abundancia del isótopo más ligero es mayor que la del pesado.²

Estas características y especialmente el que no se transforman en otro elemento y el formar parte de múltiples compuestos, los hace muy útiles en paleontología. Los isótopos estables forman parte de diversas biomoléculas y por lo consiguiente de tejidos vivos, como huesos, esmalte dental, piel, etcétera.⁵ Al morir un organismo, gran parte de su cuerpo se descompone y desaparece, pero huesos y dientes, tienden a perdurar un poco más. Con algo de suerte, estos restos pueden conservarse, y aun cuando en el proceso de fosilización hay cambios químicos, los isótopos estables pueden permanecer sin combinarse con otros elementos, lo que los hace muy útiles para estudiar diversos aspectos ecológicos del organismo encontrado, como son su dieta, su posición en la cadena trófica, el tipo de hábitat en el cual vivió, entre otros (Tabla 1).^{11,12}

Elemento	Isótopo	Abundancia (%)	Uso
Carbono	¹² C	98.99	Determinar la dieta de herbívoros, el tipo de vegetación y hábitat.
	¹³ C	1.11	
Nitrógeno	¹⁴ N	99.63	Deducir las cadenas tróficas que existieron.
	¹⁵ N	0.37	
Oxígeno	¹⁶ O	99.759	Inferir el clima, tipo de hábitat, patrones de migración y fisiología del organismo.
	¹⁸ O	0.204	

Tabla 1. Isótopos empleados en estudios que impliquen mamíferos. Es importante hacer notar que, en el caso del colágeno, existen los tres tipos de isótopos mientras que en el esmalte dental el nitrógeno está ausente, debido a que este elemento no forma parte estructural de este tejido.

¹²C/¹³C Y FOTOSÍNTESIS

El carbono se encuentra presente principalmente como ¹²C y ¹³C en las moléculas de CO₂ atmosférico; sin embargo, los animales no lo tomamos directamente de la atmósfera, sino lo obtenemos de otras fuentes, como las plantas o de otro animal. Las plantas, en cambio, sí son capaces de usar el CO₂ atmosférico por medio de la fotosíntesis, fenómeno en el que una molécula de CO₂ se combina con una de agua, y usando luz solar se convierte en azúcar y oxígeno. Contrariamente a lo que se puede pensar, en las plantas existen tres tipos de vías fotosintéticas: la C₃, la C₄ y la CAM.^{2,8}



© Rosa Borrás, de la serie *Chicozapote*, 2010.



En la forma de C_3 , se produce una molécula de tres carbonos llamada RuBisCo, que se encuentra presente en árboles y arbustos principalmente de zonas frías y templadas y algunos pastos de zonas frías.⁸ En C_4 , la primera molécula obtenida contiene cuatro carbonos, la fosfoenolpiruvatocarboxilasa y se encuentra principalmente en los pastos y algunos árboles y arbustos de zonas áridas y cálidas.¹⁰ La vía CAM (metabolismo ácido crasuláceo), ocurre en plantas suculentas como las cactáceas, bromelias y orquídeas.^{5, 8} Al existir moléculas de CO_2 con ^{12}C y ^{13}C , estas plantas deben decidir cuál usar. Las plantas que presentan la vía C_3 prefieren moléculas de $^{12}CO_2$ a las de $^{13}CO_2$, ya que este último es más pesado que usar ^{12}C y estas plantas difunden el CO_2 hacia su interior. En contraste, las plantas cuya fotosíntesis es del tipo C_4 , bombean el CO_2 hacia su interior y pueden usar ambos tipos de molécula sin ningún problema, por lo que tendrán mayor concentración de ^{13}C que las C_3 .⁸ En cambio, las CAM se comportan como las C_3 y C_4 , dependiendo de las condiciones ambientales, por lo que sus concentraciones de ^{13}C no se distinguen de las vías C_3 y C_4 .⁵

DIETA

En los herbívoros, al consumir las plantas, el carbono que se encuentra presente en el tejido vegetal pasa a formar parte de los tejidos animales. Al morir, en los tejidos duros como dientes y huesos, este carbono tiende a permanecer por lo que, si lo analizamos, indicará el tipo de planta que consumió, si es una que presentaba fotosíntesis C_3 o C_4 .^{4, 6} Así, un animal que consumió plantas C_3 tendrá menos ^{13}C que uno que consumió plantas C_4 . Esto nos permite separar el tipo de dieta en tres categorías: ramo-

neador si se alimentaba de plantas C_3 , pastador si consumía pastos, y herbívoro de dieta mixta si usaba ambos tipos de planta.⁷ Un carnívoro, al devorar a otro animal, incorpora el carbono presente de su presa a su cuerpo, por lo que al analizarlo nos indicará la zona donde vivía; si tiene una mayor proporción de ^{13}C indicará que se alimentaba de herbívoros cuya alimentación se basaba en pastos y vivía en pastizales o sabanas; y al contrario, menos ^{13}C presente indica si se alimentaba de herbívoros cuya dieta se basaba en hojas de árboles y arbustos y vivía en bosques o matorrales.⁹

Es importante aclarar que esto sólo es válido para mamíferos; sin embargo, también se puede usar en reptiles, aves, peces, anfibios e invertebrados, pero dado que el metabolismo de estos animales es distinto al de los mamíferos, la forma de interpretar sus hábitos alimenticios y hábitat es diferente.⁶

$^{16}O/^{18}O$ Y AGUA

El carbono sirve para diferenciar la dieta de los herbívoros y, en el caso de los carnívoros, para determinar de forma indirecta el tipo de hábitat donde vivía. Sin embargo, para una mejor comprensión del tipo de hábitat es necesario usar otro tipo de isótopo: el oxígeno.^{10, 13}

El oxígeno se encuentra presente en moléculas como el CO_2 , O_2 atmosférico y el agua,² en forma de ^{16}O y ^{18}O ; y al contrario del carbono, el cual las plantas son las primeras en incorporarlo a los tejidos vivos por medio de la fotosíntesis, el oxígeno puede ser incorporado de manera directa a los tejidos. En el caso de los mamíferos, el agua es la principal fuente de donde se obtiene, seguida por el que se obtiene de la respiración y los alimentos consumidos.⁶

Hay diversos procesos que influyen en la proporción de isótopos de oxígeno en el organismo, uno de ellos es el metabolismo. Debido a los procesos metabólicos, las moléculas de ^{18}O son más difíciles de usar que las moléculas de ^{16}O , por lo que en la construcción de nuevos compuestos habrá una mayor cantidad de ^{16}O que de ^{18}O . Sin embargo, el oxígeno se pierde por medio de la orina, la respiración y el sudor, y al contener mayor cantidad de moléculas de ^{16}O que de ^{18}O , este isótopo se perderá con facilidad. Pero, dado que la mayor parte del oxígeno proviene

del agua, factores como el clima y la aridez también influyen en la composición de ambos isótopos en el cuerpo de un organismo.¹² Esto es, si el clima es demasiado cálido, las moléculas de agua que contengan ^{16}O se evaporarán más fácilmente que aquellas que contengan ^{18}O , por lo que el agua tendrá mayor proporción de este isótopo que del otro. Así, cuando un animal beba esta agua, incorporará una gran cantidad de ^{18}O a su cuerpo; caso idéntico sucede con los alimentos de origen vegetal: las plantas pierden agua por evapotranspiración, y si estas están sometidas a temperaturas cálidas, las moléculas de H_2^{16}O se evaporarán primero que las de H_2^{18}O , y por lo consiguiente tendrán una mayor cantidad del isótopo ^{18}O , de modo que al ser consumidas por los herbívoros éste se incorporará a sus tejidos.¹³

En este último caso, podremos inferir las condiciones climáticas existentes en el pasado. Si el contenido de ^{18}O es muy grande, nos indicará que las condiciones climáticas que existieron en esa zona fueron cálidas; en caso contrario, corresponderán a un clima frío. Y si usamos estos datos junto con los de carbono podemos inferir el tipo de hábitat. Así, una menor concentración de ^{18}O y ^{13}C nos indicará que el sitio donde vivía un mamífero era una zona cerrada que podríamos identificar como un bosque, y si la concentración es mayor, era una zona abierta, tal como un pastizal o sabana.³

USO

El principal uso de ambos tipos de isótopos es inferir la dieta de un mamífero extinto así como el clima de la zona donde vivió y, de manera indirecta, el tipo de vegetación que existió en su hábitat. Esto es muy útil, ya que nos permite comparar esta información con la obtenida por el estudio de la morfología de los restos fosilizados. Así, por ejemplo, se sabe que los gonfoterios (un pariente de los mamuts y elefantes) de Sudamérica, del Pleistoceno, que tradicionalmente se consideran como ramoneadores, eran capaces de cambiar su tipo de dieta, dependiendo del sitio donde vivían. Por ejemplo, los gonfoterios que habitaron en Chile eran ramoneadores, mientras que aquellos que habitaron Ecuador basaban su dieta principalmente en pastos.¹¹ Y en el caso de México, aplicando

esta técnica en caballos y un mamut encontrado en El Cedral, San Luis Potosí, se encontró que ambas especies tenían una dieta mixta y el tipo de hábitat en que vivieron fue un pastizal.¹⁰

Esta es una de las formas de aplicación de la técnica de isótopos estables, la cual tiene muchas aplicaciones como son los estudios enfocados a medir el impacto de especies invasoras en ecosistemas nativos, pruebas de control de calidad de productos como la miel y vinos, entre otros.

B I B L I O G R A F Í A

- ¹ Allégre CJ. *Isotope geology*. Cambridge University Press, United Kingdom (2005).
- ² Ehleringer JR y Rundel PW. Stable isotopes: History, units, and instrumentation en Rundel, PW, Ehleringer JR y Nagy KA (edit.) *Stable isotopes in ecological research*, Springer-Verlag, USA (1989) 1-15.
- ³ Feranec RS y MacFadden BJ. Isotopic discrimination of resource partitioning among ungulates in C3-dominated communities from the Miocene of Florida and California. *Paleobiology* 32 (2006) 191-205.
- ⁴ Gannes LZ, O'Brien DM y Martínez del Río C. Stable isotopes in animal ecology: assumptions, caveats, and a call for more laboratory experiments. *Ecology* 78 (1997) 1271-1276.
- ⁵ Keely JE y Rundel PW. Evolution of CAM and C4 carbon-concentrating mechanism. *International Journal of Plant Science* (Suplemento 3) 164 (2003) 55-77.
- ⁶ Koch PL. Isotopic study of the biology of modern and fossil vertebrates en Michener R y Lajtha K. (edit.) *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. Blackwell Publishing, USA (2007) 99-154.
- ⁷ MacFadden B y Cerling TE. Mammalian herbivore communities, ancient feeding ecology, and carbon isotopes: a 10 million-year sequence from the neogene of Florida. *Journal of Vertebrate Paleontology* 16 (1996) 103-115.
- ⁸ Medrano H y Flexas J. Fotorrespiración y mecanismos de concentración del dióxido de carbono en Azcón-Bieto J y Talón M. (edit.) *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. McGraw-Hill Interamericana, España (2000) 187-201.
- ⁹ Palmqvist, P, Pérez-Claros, JA, Janis, CM, Figuerido, B, Torregrosa, V y Gröcke, DR. Biogeochemical and ecomorphological inferences on prey selection and resource partitioning among mammalian carnivores in an Early Pleistocene community. *Palaio* 23 (2008) 724-737.
- ¹⁰ Pérez-Crespo VA, Sánchez-Chillón B, Arroyo-Cabral J, Alberdi MT, Polaco JO, Santos-Moreno A, Benammi M, Morales-Fuentes P y Cienfuegos-Alvarado E. La dieta y el hábitat del mamut y los caballos del pleistoceno tardío de El Cedral con base en isótopos estables ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26 (2009) 347-355.
- ¹¹ Sánchez B, Prado JL y Alberdi MT. Feeding ecology, dispersal, and extinction of South American Pleistocene gomphotheres (Gomphotheriidae, Proboscidea). *Paleobiology* 30 (2004) 146-161.
- ¹² Sánchez B. Reconstrucción del ambiente de mamíferos extintos a partir del análisis isotópico de los restos esqueléticos en Alcornó P, Redondo R y Toledo J. (edit.) *Nuevas técnicas aplicadas al estudio de los sistemas ambientales: los isótopos estables*. Universidad Autónoma de Madrid, España (2005) 49-64.
- ¹³ Sponheimer M y Lee-Thorp JA. Oxygen isotopes in enamel carbonate and their ecological significance. *Journal of Archaeological Science* 26(1999) 723-728.

Víctor Adrián Pérez-Crespo,
Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM.
e-mail: vapp79@gmail.com
Luis M. Alva Valdivia, Laboratorio de
Paleomagnetismo, Instituto de Geofísica, UNAM.