
35 AÑOS DE ANÁLISIS DE ISÓTOPOS ESTABLES EN LA ARQUEOLOGÍA ARGENTINA:
CONCEPTOS, FUNDAMENTOS, METODOLOGÍA Y APLICACIONES

*Héctor Osvaldo Panarello¹, Augusto Tessone², Violeta Anahí Killian Galván³, Celeste Tamara Samec⁴,
Sayuri Kochi⁵, Malena Pirola⁶, Cecilia del Valle Chaile⁷, Suray Pérez⁸, Belén Pastora Sandoval⁹,
Atilio Francisco Zangrando¹⁰, Estela Ducos¹¹, Nora Guida¹² y Nasareno Piperissa¹³*

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es celebrar más de tres décadas de la integración de los análisis de isótopos estables en investigaciones arqueológicas en nuestro país. Se presenta una síntesis sobre los conceptos,

¹ Instituto de Geocronología y Geología Isotópica / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria (C 1428EHA). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. hector@ingeis.uba.ar

² Instituto de Geocronología y Geología Isotópica / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria (C 1428EHA). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. gutitessone@gmail.com

³ Instituto Interdisciplinario Tilcara, Universidad de Buenos Aires / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Belgrano 445, Tilcara (C 4624), Jujuy, Argentina. violetakillian@gmail.com

⁴ Instituto de Geocronología y Geología Isotópica / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria (C 1428EHA). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina / Instituto de Ciencias Naturales Alexander von Humboldt, Universidad de Antofagasta, Av. Universidad de Antofagasta 02800, 1271155, Antofagasta, Chile / Department of Archaeology, Max Planck Institute for the Science of Human History, Kahlaische Strasse 10, 07745, Jena, Germany. celestesamec@gmail.com

⁵ Instituto de Geocronología y Geología Isotópica / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria (C 1428EHA). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. kochisayuri@gmail.com

⁶ Instituto de Arqueología, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. 25 de Mayo 221 3º piso, (C1002ABE). Ciudad Autónoma de Buenos Aires. malenapirola@gmail.com

⁷ Instituto de Geocronología y Geología Isotópica / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria (C 1428EHA). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. cecy.30.01@gmail.com

⁸ Centro Austral de Investigaciones Científicas / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Bernardo Houssay 200 (V9410CAB). Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina. surayperez@cadic-conicet.gob.ar

⁹ Instituto de Geocronología y Geología Isotópica / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria (C 1428EHA). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. b.sandoval.r@gmail.com

¹⁰ Centro Austral de Investigaciones Científicas / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Bernardo Houssay 200 (V9410CAB). Ushuaia, Tierra del Fuego. Argentina / Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Puan 480 (1420). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. panchozan@yahoo.com.ar

¹¹ Instituto de Geocronología y Geología Isotópica / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria (C 1428EHA). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. estela@ingeis.uba.ar

¹² Instituto de Geocronología y Geología Isotópica / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria (C 1428EHA). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. guida@ingeis.uba.ar

¹³ Instituto de Geocronología y Geología Isotópica / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Pabellón INGEIS, Ciudad Universitaria (C 1428EHA). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. nazareno@ingeis.uba.ar

fundamentos teóricos y metodológicos y las aplicaciones, principalmente en tres grandes temas: paleodieta, paleomovilidad y paleoambiente. A su vez, brindamos ejemplos de abordajes isotópicos sobre problemáticas de paleodietas en sociedades cazadoras recolectoras y agricultoras; movilidad de grupos humanos; estrategias de pastoreo; preparación y cocción de alimentos; estudios paleoambientales y paleoclimáticos. Este compendio puede resultar una referencia útil para estudiantes e investigadores que decidan adentrarse en este campo de investigación. Los casos mencionados no agotan el estado de la cuestión, ni abarcan todas las regiones donde fueron desarrollados estos estudios, sino que el propósito es mostrar la diversidad temática y el modo en que los isótopos estables permiten ampliar el conocimiento sobre las sociedades en el pasado.

PALABRAS CLAVE: isótopos estables; arqueología; paleodieta; paleomovilidad; paleoclima.

ABSTRACT

The main goal of this work is to celebrate more than three decades of the application of stable isotope analyses in Argentinian archaeology. We present a synthesis of the concepts, theoretical and methodological aspects and applications covering three main topics: paleodiet, paleomobility and paleoenvironment. At the same time, we provide examples of isotopic approaches to study problems such as paleodiets in hunter-gatherer and agricultural societies, human mobility, herding strategies, food preparation and cooking, and paleoenvironmental and paleoclimatic studies. This compendium will be a useful reference for students and researchers inclined to enter this field of research. However, the cases mentioned here do not represent the state of art nor do they cover all the Argentinian regions where these studies were carried out, but rather show the thematic diversity and the way in which stable isotope analyses allow to broaden our knowledge about societies in the past.

KEYWORDS: stable isotopes; archeology; paleodiet; paleomobility; paleoclimate.

Manuscrito recibido: 18 de noviembre de 2020.

Aceptado para su publicación: 15 de abril de 2021.

INTRODUCCIÓN

Los análisis de isótopos estables aplicados a preguntas arqueológicas en Argentina se remontan a fines de 1980 y principios de 1990 y fueron pioneros en Latinoamérica. El primer trabajo enfocado en la reconstrucción de paleodietas humanas fue realizado a partir de mediciones de $\delta^{13}\text{C}$ en restos humanos recuperados en la cueva Haichol, Patagonia norte (Fernández & Panarello, 1988-1990). Esto fue posible porque en el laboratorio de isótopos estables del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS) se desarrolló una técnica para la medición de

carbono-13 en materiales orgánicos con el fin, entre otros, de estudiar el fraccionamiento isotópico durante la síntesis de benceno para dataciones por ^{14}C (Panarello, Albero & Angiolini, 1983) y, luego, con el objeto de confirmar el síndrome de Kranz en gramíneas argentinas (Panarello & Sánchez, 1985). En ese entonces, los datos de isótopos estables no eran muy numerosos en arqueología a nivel global, pero la importancia de registrar las relaciones tróficas en poblaciones humanas en el pasado quedó establecida en nuestro país a partir de ese trabajo pionero. Por esos años, los mismos autores publicaron un estudio de $\delta^{18}\text{O}$ en aguas meteóricas y su reflejo en valores de tejidos de

humanos y camélidos de la Puna jujeña (Fernández & Panarello, 1989-1990). Para el mismo momento, Yesner y coautores publicaron en 1991 un trabajo sobre la subsistencia de cazadores recolectores de Tierra del Fuego, incorporando por primera vez valores de $\delta^{15}\text{N}$ en colágeno y de $\delta^{13}\text{C}$ en bioapatita de restos humanos, realizando en este caso los análisis en el laboratorio Geochron en Estados Unidos (Yesner, Figuerero Torres, Guichón & Borrero, 1991).

En esos años y en el marco de proyectos arqueológicos, se emprendieron trabajos que buscaban reconstruir el contexto ambiental donde se desarrollaron las poblaciones humanas (Fernández, Panarello & Valencio, 1988-1990; Panarello, 1987), como fue el estudio de paleotemperaturas a partir de la medición de $\delta^{18}\text{O}$ sobre valvas de *Diplodon* del ambiente fluvial patagónico (Fernández et al., 1988-1990). Por otro lado, Panarello (1987) reconstruyó las paleotemperaturas del agua superficial del canal Beagle (Tierra del Fuego) a partir de valores de $\delta^{18}\text{O}$ de moluscos de diferentes taxones recuperados en el sitio arqueológico Túnel I. Posteriormente, se publicó un trabajo sobre las relaciones isotópicas del carbono sobre distintas especies del Noroeste Argentino, incluyendo materiales de la transición Pleistoceno/Holoceno del sitio Barro Negro

(Fernández et al., 1991). En este trabajo, los autores buscaron comprender los motivos de la extinción del caballo americano y su relación con el cambio climático en el altiplano de Jujuy. En el año 1992, Fernández y coautores publican los primeros valores $\delta^{13}\text{C}$ sobre residuos carbonizados con la intención de estudiar los alimentos cocinados en las vasijas y detectar la presencia de maíz en las preparaciones (Fernández, Panarello & Ramos, 1992). En suma, en seis años –entre 1987 y 1992– se registraron una serie de trabajos que sentaron las bases del posterior desarrollo de los isótopos estables en nuestro país. Estos trabajos iniciales cubrieron una gran diversidad de temáticas y se desarrollaron casi con exclusividad en el INGEIS, realizándose en el país todos los procesos metodológicos y analíticos necesarios.

A partir de 1998 podríamos señalar el comienzo de un “segundo período” en la historia de las investigaciones, pues desde entonces todos los años se ha publicado al menos un trabajo en donde los isótopos estables son utilizados como metodología para investigar un problema arqueológico (Figura 1). Su importancia también comenzó a reflejarse en diversos eventos científicos, inicialmente a partir de la organización de simposios en reuniones científicas nacionales. El primero fue organizado por el Dr. Ricardo Guichón en el marco de las

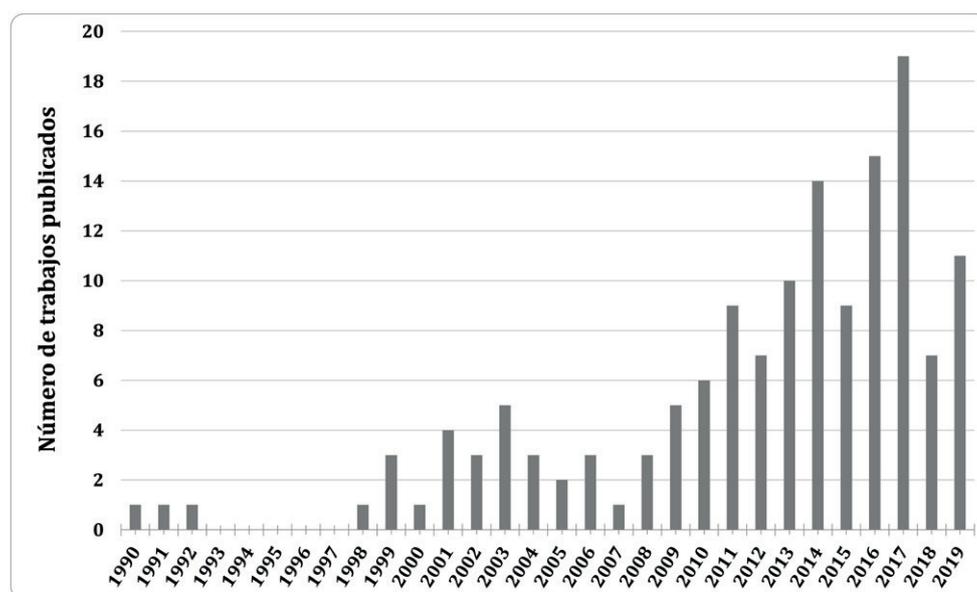


Figura 1. Número de publicaciones en revistas de habla hispana que incluyen resultados inéditos de análisis de isótopos estables en Argentina durante los últimos 30 años según búsqueda en Google Scholar ($N = 144$). Tomado con modificaciones de Samec, Pirola & Killian Galván (2019).

Jornadas Nacionales de Antropología Biológica en el año 2001 (ver por ejemplo *Revista Argentina de Antropología Biológica* 3 (2): 31-41) y luego le siguió el “Taller de Arqueología e Isótopos Estables en el Sur de Sudamérica” cuyo primer encuentro tuvo lugar en la ciudad de Malargüe (Mendoza) en 2006 (Neme, Barberena, Giardina & Gil, 2006). El desarrollo de estas actividades dio origen a volúmenes especiales en revistas de circulación periódica (Barberena, Gil, Neme & Tykot, 2009a; Morales, Tessone & Barberena, 2018; Otaola, Santana-Sagredo & Szpak, 2020; Zangrando, Tessone, Ugan & Gutiérrez, 2014) y al dictado de cursos y seminarios en diversas casas académicas.

La relevancia que ha cobrado la aplicación de isótopos estables en arqueología amerita una síntesis sobre los principales conceptos, métodos y aplicaciones, la cual puede resultar útil para estudiantes que decidan adentrarse en este campo de investigación. Particularmente, este trabajo se enfoca en lo que podríamos definir como los tres grandes temas en los que se aplica el análisis de isótopos estables en arqueología: paleodieta, paleomovilidad y paleoambiente. En el primero, los isótopos estables se utilizan para dilucidar el consumo de recursos, ya sea por parte de poblaciones humanas o alguna especie en particular recuperada en el registro arqueológico. Dependiendo de la composición isotópica medida, los recursos pueden ser alimentos sólidos o el agua consumida. Este tipo de estudios busca caracterizar la dieta (Panarello, Tessone & Zangrando, 2010). En el caso de la paleomovilidad, los isótopos estables de elementos como el estroncio y el oxígeno permiten evaluar el lugar de origen, la escala de movilidad y las migraciones dentro de un marco interdisciplinario de las historias de vida humana (Ugan et al., 2012; Barberena et al., 2017; Serna et al., 2020a, 2020b). Por otro lado, en las investigaciones paleoambientales, los análisis isotópicos de elementos livianos (hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno) se basan en la fuerte influencia que tiene la actividad biológica y los procesos fisicoquímicos del ciclo hidrológico sobre la composición isotópica de diversos

sustratos. El objetivo final es la caracterización del ambiente en el cual las poblaciones humanas se desarrollaron para entender cómo fue esta interacción y evolución a través del tiempo.

La segunda motivación de este trabajo es celebrar la consolidación de un grupo de trabajo cuya conformación fuera impulsada por el Dr. Héctor Panarello en el INGEIS y que acompañó el desarrollo de esta metodología en la arqueología de nuestro país. A partir de esta experiencia también brindamos algunos ejemplos sobre la aplicación de isótopos estables en arqueología. Los casos mencionados no agotan el estado de la cuestión ni abarcan todas las regiones donde fueron desarrollados estos estudios, sino que el propósito de este artículo es mostrar la diversidad temática y el modo en que los isótopos estables permiten ampliar conocimiento sobre el pasado.

CONCEPTOS BÁSICOS, FUNDAMENTACIÓN Y NOTACIÓN DE LOS ANÁLISIS DE ISÓTOPOS ESTABLES

De acuerdo a los modelos más sencillos, los átomos se hallan compuestos por partículas subatómicas, entre las que se encuentran los protones, neutrones y electrones. Se denomina número másico (A) a la suma de los protones y neutrones que componen el núcleo de un elemento químico, mientras que el número atómico (Z) expresa solamente el número de protones presentes en el mismo. Mientras el número atómico incide en la configuración electrónica y en la ubicación del elemento en la tabla periódica, el número másico determina su masa atómica. Concretamente, el término “isótopo” (“mismo lugar” en griego, debido a que ocupan el mismo lugar en la tabla periódica) hace referencia a variantes o “nucleídos” de un mismo elemento que poseen el mismo número atómico pero diferente número másico, dado que difieren en el número de neutrones que componen el núcleo. Esto no afecta la carga del átomo, pero sí sus propiedades fisicoquímicas debido a que su masa es ligeramente diferente. Dentro de estas variantes de un mismo elemento

podemos encontrar isótopos estables –aquellos que no presentan una actividad radiactiva apreciable (emisión de radiación ionizante)– e isótopos inestables –aquellos que sí presentan dicha actividad y con el tiempo acaban transformándose en átomos estables–. Por ejemplo, en el caso de un átomo de carbono, en su forma más común este presenta seis protones y seis neutrones, de forma que su número másico es 12 (^{12}C), aunque existen otras versiones de los átomos de carbono con siete u ocho neutrones en su núcleo, con lo que su número másico es de 13 y 14 respectivamente (^{13}C y ^{14}C) (Figura 2). Vale mencionar que ^{12}C y ^{13}C son isótopos estables y ^{14}C es inestable.

y el liviano (*e.g.* $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$). Justamente, dado que δ representa diferencias relativas, su valor puede ser tanto negativo como positivo, al tiempo que la abundancia relativa del isótopo pesado con respecto del liviano suele ser de una magnitud tan pequeña que los valores δ se expresan en “partes por mil” (‰). Sin embargo, vale mencionar que las convenciones tratadas hasta aquí corresponden a la expresión de los resultados del análisis de los isótopos estables –*e.g.* $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, etc.– mientras que en el caso de los análisis que incluyen isótopos radiogénicos no se emplea la notación delta, sino que los valores de la relación se expresan en términos absolutos –*e.g.* $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ –, aunque

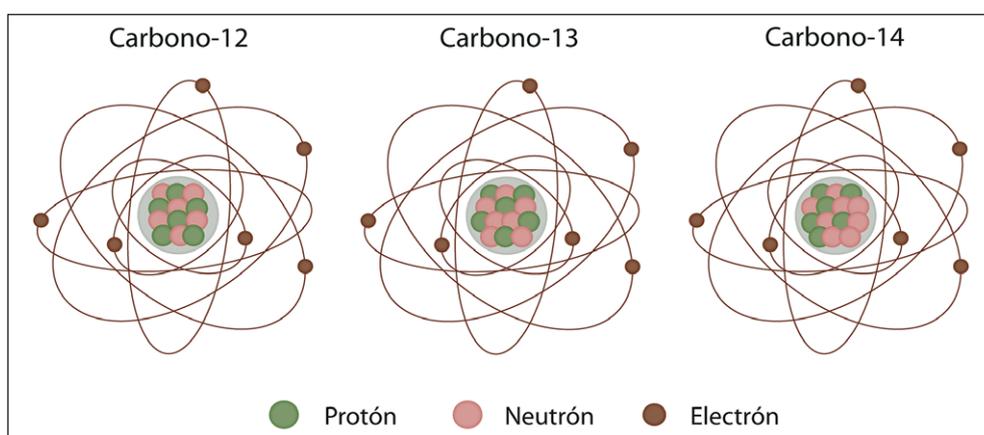


Figura 2. Isótopos estables (^{12}C y ^{13}C) e inestables (^{14}C) del carbono.

Al medir la composición isotópica de un elemento, por ejemplo, del carbono contenido en el colágeno de un hueso, lo que se está midiendo es la proporción de un isótopo más pesado y menos abundante del carbono (^{13}C) en relación con otro más liviano y abundante (^{12}C). Por razones de simplicidad, los resultados de las mediciones de las composiciones isotópicas se expresan con la nomenclatura delta (δ), utilizando como superíndice el número másico del isótopo más pesado seguido del símbolo del elemento (*e.g.* $\delta^{13}\text{C}$). Entonces, las composiciones isotópicas son valores que representan diferencias relativas en las cantidades de dos isótopos de una muestra comparada con un estándar de referencia y calculadas a partir de la siguiente ecuación: $\delta = (R_{\text{muestra}} - R_{\text{estándar}}) / R_{\text{estándar}}$ donde R representa la relación entre el isótopo pesado

en estos casos también se emplea un estándar internacional.

El estándar utilizado para medir las composiciones isotópicas es un material de referencia internacional que cuenta con un valor R conocido y aceptado que define la escala de las mediciones isotópicas para cada elemento (Tabla 1). Sin embargo, debido a una cuestión de costos y accesibilidad, los laboratorios suelen emplear materiales de referencia secundarios con composiciones isotópicas conocidas y calibradas según los estándares internacionales, distribuidos por organismos tales como la International Atomic Energy Agency (IAEA) y el National Institute of Standards and Technology (NIST) o desarrollados por los propios laboratorios (Panarello, 1989; Szpak, Metcalfe & Macdonald, 2017).

Relación Isotópica	Notación	Estándares Internacionales	Siglas
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\delta^{13}\text{C}$	Vienna Pee Dee Belemnite	VPDB
$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	$\delta^{15}\text{N}$	N_2 atmosférico	AIR
$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	Vienna Standard Mean Ocean Water	VSMOW
$^2\text{H}/^1\text{H}$	$\delta^2\text{H}$	Vienna Standard Mean Ocean Water	VSMOW
$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	Vienna Canyon Diablo Troilite	VCDT
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Strontium Carbonate Isotopic Standard	SRM-987

Tabla 1. Estándares Internacionales para cada relación isotópica.

ESPECTROMETRÍA DE MASAS

La medición de los isótopos estables se realiza en un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas (IRMS por sus siglas en inglés). Para poder ser analizadas en este equipo, las muestras deben ser previamente convertidas a gases simples (CO_2 y N_2). Existen dos formas diferentes de realizar esta conversión: en el sistema *off-line* la preparación y purificación del gas se realiza en líneas de preparación independientes, en vacío, de operación manual, mientras que en el sistema *on-line* las muestras son convertidas a gas utilizando equipos periféricos directamente adosados al IRMS. En este último caso la cantidad de muestra necesaria es menor y el tiempo total del análisis es significativamente menor para cada muestra. Un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas tiene tres componentes fundamentales: la fuente de ionización, el analizador y el detector. En la fuente de ionización, los electrones emitidos por un filamento caliente ionizan las moléculas de gas. Los iones son acelerados hacia el analizador y separados por campos magnéticos para afectar la trayectoria de las partículas cargadas en función de su relación masa-carga (m/z) que son detectadas en copas Faraday. Las intensidades de los haces de iones son medidas por electromedidores y expresadas como voltios (V) o milivoltios (mV). En la actualidad, la medición de la composición isotópica del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) por espectrometría de masas se suele utilizar en casos de muestras complejas (*e.g.* provenientes de sitios petroleros) y la medición de forma rutinaria (*e.g.* aguas de precipitación, subterráneas, etc.) se realiza por espectroscopía láser, técnica que permite medir

ambos isótopos al mismo tiempo y directamente sobre la muestra líquida.

En Argentina aún son pocos los equipos disponibles para la medición de isótopos estables en distintas fracciones y materiales. Recientemente, se inauguró un laboratorio dedicado a la medición de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en materia orgánica en San Rafael, Mendoza. Asimismo, en San Luis y Mar del Plata cuentan con equipos para medir $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en aguas. Por último, en la CNEA se dispone de un espectrómetro para medir $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. En los dos acápite que siguen nos referiremos en detalle a los equipos disponibles en el INGEIS.

$\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en materia orgánica

En el INGEIS el análisis de los isótopos estables de carbono y nitrógeno en materia orgánica (*e.g.* colágeno, músculo, pelo) se realiza en un analizador elemental (EA1108 Carlo Erba) acoplado a un IRMS de flujo continuo (Thermo Scientific Delta V Advantage) mediante una interfaz (ConFlo IV) (Figura 3). El mismo funciona de manera ininterrumpida desde 2009. El analizador elemental (EA por sus siglas en inglés) es el responsable de convertir la muestra a CO_2 y N_2 y luego un flujo de gas portador o *carrier* (He) transporta los gases generados desde el analizador elemental al IRMS. El EA consiste principalmente en un reactor de oxidación y otro de reducción que se encuentran a alta temperatura, una trampa de agua y una columna cromatográfica a baja temperatura. Dentro del EA se produce la combustión de la muestra, facilitada por un pulso de He enriquecido en O_2 y por la reacción

exotérmica de la oxidación de la cápsula de estaño donde se encuentra la muestra. Los gases resultantes circulan por dentro de los reactores, completando la oxidación y reducción de los gases de forma de obtener únicamente CO_2 , N_2 y H_2O . El agua es retenida en la trampa y así el CO_2 y el N_2 ingresan en la columna cromatográfica cuya función es separar ambos gases, eluyendo primero el N_2 y luego el CO_2 . Gracias a esta separación, es posible medir en el IRMS la relación isotópica del nitrógeno y del carbono de una muestra en una misma serie de medición. El ConFlo IV es la interfaz que permite conectar el EA al IRMS permitiendo introducir, además, pulsos del patrón de trabajo. Las muestras de materia orgánica son medidas en una serie en forma conjunta con referencias internas de valor conocido preparadas en cápsulas de estaño al igual que los materiales medidos. Estas referencias internas, calibradas contra patrones internacionales, permiten normalizar los valores de las muestras *versus* el patrón internacional, independizándonos de esta forma del valor del patrón de trabajo y permitiendo la comparación con resultados de distintos laboratorios.

la muestra en una línea de alto-vacío *off-line* mediante el ataque con ácido fosfórico (100%). La muestra es insertada en un reactor cuyo diseño incluye un brazo lateral en donde se coloca el ácido. Una vez que el reactor se encuentra en vacío, se vierte el ácido sobre la muestra y se lo coloca en un baño de temperatura constante ($\pm 0,1^\circ\text{C}$) para que muestras y patrones reaccionen en condiciones similares. Posteriormente, el gas generado es purificado criogénicamente para eliminar el agua y otros gases condensables. La medición isotópica del gas resultante se realiza en un IRMS (Finnigan Mat Delta S) de doble entrada (*dual inlet*) (Figura 4). A diferencia del IRMS de flujo continuo, este espectrómetro no necesita de gas portador. Tanto el gas de la muestra como el patrón de trabajo son introducidos en dos reservorios de volumen variable. En el caso de las relaciones isotópicas del carbono, el patrón de trabajo se encuentra calibrado contra patrones internacionales y, por lo tanto, no es necesario realizar una normalización posterior de los datos. En el caso del oxígeno, los resultados son normalizados utilizando una referencia interna



Figura 3. Equipo disponible en INGEIS para la medición de valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en materia orgánica.

$\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en carbonatos

En el INGEIS también se realiza el análisis de la composición isotópica del carbono y el oxígeno en bioapatita o carbonatos biogénicos. El método consiste en generar el CO_2 correspondiente a

de valor conocido correspondiente a la misma serie de medición. Aunque este equipo puede utilizarse para medir las relaciones isotópicas de carbono en materia orgánica, desde el 2010 ha sido remplazado por el equipo nuevo para esta función.



Figura 4. Finnigan Mat Delta S de doble entrada utilizado en INGEIS para medir la composición isotópica del carbono y el oxígeno en carbonatos biogénicos.

RELACIONES ISOTÓPICAS MAYORMENTE UTILIZADAS EN ARQUEOLOGÍA

Isótopos estables del carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)

Los isótopos estables del carbono que se utilizan en arqueología son dos: el ^{13}C y el ^{12}C . Su ingreso en la biósfera tiene lugar a través de la fotosíntesis de las plantas a partir del CO_2 atmosférico. Existen diferentes vías fotosintéticas, comúnmente denominadas C_3 , C_4 y crasuláceas de metabolismo ácido –CAM– (Tieszen, 1991). El ciclo más común es el de Calvin-Benson o C_3 , el cual comprende una discriminación importante ($\sim 20\%$). Por otro lado, el patrón fotosintético que involucra cuatro átomos de carbono, denominado Hatch-Slack o C_4 , es más corto y presenta un fraccionamiento menor ($\sim 12\%$). Pueden ser pastos o gramíneas y, también, plantas de alto valor nutritivo, como son el maíz, la caña de azúcar y el sorgo. El tercer grupo se halla integrado por las plantas CAM, entre las que encontramos cactáceas y orquídeas. En el caso de los ambientes acuáticos, en términos generales se observa una diferencia entre los vegetales de agua dulce y de agua salada debido a la diferencia entre el CO_2 atmosférico y el bicarbonato disuelto en el agua. Pero los

productores acuáticos (por ejemplo, las macroalgas y el fitoplancton) exhiben una gran variabilidad en valores $\delta^{13}\text{C}$, abarcando todo el rango comparable a las plantas terrestres C_3 y C_4 . Esto depende de diferentes variables ambientales y fisiológicas, por lo que la definición de la línea de base en sistemas acuáticos suele ser más compleja que en sistemas terrestres (Casey & Post, 2011).

Al estudiar cadenas tróficas en momentos prehistóricos o históricos es importante considerar el cambio ocurrido en la composición isotópica del CO_2 atmosférico a lo largo del tiempo. Este cambio, denominado comúnmente como “Efecto Suess”, se produjo a raíz de la quema de combustibles fósiles durante los últimos 200 años. El ingreso de CO_2 empobrecido en ^{13}C en la atmósfera generó que el valor $\delta^{13}\text{C}$ promedio del CO_2 atmosférico haya pasado de $-6,5\%$ durante el Holoceno a $-8,4\%$ en la actualidad (Keeling et al., 2017). En consecuencia, al realizar reconstrucciones de cadenas tróficas con cronologías previas a la era industrial a partir de muestras modernas, debemos corregir los valores actuales para poder realizar extrapolaciones correctas, *i.e.* añadiendo de 1-2% a los valores, según la antigüedad (Fry, 2006).

En la reconstrucción paleodietaria, los análisis isotópicos del carbono permiten determinar el

patrón fotosintético predominante en la dieta humana y animal. En el caso de los herbívoros, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ medidos sobre sus tejidos reflejan la proporción de vegetales C_3 y C_4 ingeridos, resultando también de utilidad en diversos campos de la ecología y la paleoecología. En el caso de las dietas humanas, esta relación isotópica ha sido fundamental para entender los procesos de domesticación de plantas en distintas partes del mundo (Hu, Ambrose & Wang, 2006; Katzenberg, 2006; Schoeninger, 2009). Esto se debe a que gran parte de las primeras especies vegetales inicialmente domesticadas pertenecen al tipo C_4 (e.g. el maíz en América o el mijo en Asia). Este tipo de análisis también ha sido utilizado para investigar la prevalencia del componente marítimo en las dietas de las sociedades humanas, por ejemplo, las dietas mesolíticas en Europa (Lillie & Richards, 2000; Milner, Craig, Bailey, Pedersen & Andersen, 2004). De esta manera, los análisis de composición isotópica del carbono en restos humanos han sido cruciales para discutir los cambios en los modos de subsistencia de las sociedades humanas a lo largo de la historia.

Isótopos estables del nitrógeno ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)

El nitrógeno posee dos isótopos estables: ^{15}N y ^{14}N . Si bien este elemento es abundante en la atmósfera como nitrógeno molecular o dinitrógeno (N_2), su presencia es un factor limitante tanto en sistemas acuáticos como terrestres. La transferencia del nitrógeno inorgánico de la atmósfera (N_2) a la esfera biológica se da a partir de un proceso denominado “fijación de nitrógeno”. Uno de los mecanismos para que ello suceda involucra organismos especializados ubicados en las raíces de las leguminosas que convierten el nitrógeno gaseoso en formas posibles de ser utilizadas por estas plantas. El resto de las plantas toman este elemento del suelo en forma de nitratos, amoníaco y amonio disueltos. Aunque hay una superposición en los valores de las especies que pueden fijar el nitrógeno de manera directa y aquellas que no pueden hacerlo, estas últimas poseen valores $\delta^{15}\text{N}$ significativamente más elevados por lo general (Heaton, 1987).

En el caso del nitrógeno, al igual que el $\delta^{13}\text{C}$, la variación en los valores $\delta^{15}\text{N}$ medidos sobre colágeno óseo de animales herbívoros se halla ligada a diferencias espaciales en los ambientes y a la influencia de variables tales como la temperatura y la disponibilidad de humedad en los valores de plantas y suelos (Ambrose, 1991). Los organismos marinos, por su parte, tienden a tener valores $\delta^{15}\text{N}$ más elevados respecto de los terrestres, pues el N_2 atmosférico disuelto en el agua es convertido en nitrato y amonio enriquecidos en ^{15}N . El nitrato enriquecido es utilizado por el fitoplancton en la base de la cadena trófica marina (Montoya, 2007). Este efecto, sumado a la extensión de las cadenas tróficas, puede producir hasta valores superiores a 20‰ en depredadores tope (Newsome, Clementz & Koch, 2010). Esta particularidad también se registra en otros sistemas acuáticos (ríos, lagos y pantanos), encontrándose organismos con valores más elevados que aquellos pertenecientes a sistemas terrestres (Katzenberg, 1989). Esta diferencia entre ambientes terrestres y marinos ha permitido el uso frecuente del $\delta^{15}\text{N}$ para estimar el consumo de recursos marinos por parte de las poblaciones humanas. Otra de las aplicaciones frecuentes del $\delta^{15}\text{N}$ es el estudio del proceso de lactancia y destete en poblaciones humanas (Tsutaya, Ishida & Yoneda, 2015) y diversas especies de animales (Balasse & Tresset, 2002).

Isótopos estables del oxígeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) e hidrógeno ($^2\text{H}/^1\text{H}$)

El estudio de la composición isotópica del hidrógeno y el oxígeno del agua –precipitaciones, agua subterránea, lagunas y ríos– es un componente central de los estudios isotópicos paleoambientales (Ehleringer & Rundel, 1989; Panarello & Dapeña, 2009) y de paleomovilidad (Daux et al., 2008; Pellegrini, Pouncett, Jay, Pearson & Richards, 2016). A medida que las masas de aire cargadas de humedad del Ecuador avanzan hacia los polos, del océano hacia los interiores continentales y/o ascienden por efectos orográficos, la precipitación preferencial de isótopos pesados resulta en valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del agua precipitada progresivamente más bajos. A escala local, entonces, la composición

isotópica de las precipitaciones está determinada por el origen de la masa de aire portadora de humedad, la cantidad de precipitación previa –que es función de la distancia al origen, altitud, etc.– y la temperatura a la cual ocurre la precipitación. La composición isotópica del agua en los lagos estará determinada por estos procesos y, particularmente en sistemas hidrológicos cerrados, por la evaporación, que retira preferencialmente los isótopos livianos del agua superficial. De esta manera, la composición isotópica de la materia orgánica, carbonatos biogénicos y autigénicos y sílice biogénica formada en los distintos archivos paleoambientales es utilizado como un registro de la composición isotópica del agua a partir de la cual precipitaron (Leng, 2004; Panarello, Sancí & Wassenaar, 2019).

En estudios de paleomovilidad, al analizar la composición isotópica del oxígeno de los tejidos, debemos considerar que la misma depende de los valores del agua ingerida por los humanos y animales, la cual puede proceder de diferentes fuentes –agua de lluvia, de ríos, manantiales, etc.–. Al mismo tiempo, debe considerarse al oxígeno respirado e ingerido a través de los alimentos (Ehleringer et al., 2008; Longinelli, 1984; Luz & Kolodny, 1985). La importancia relativa de estos componentes dependerá de la especie elegida. En el caso del oxígeno en bioapatita, las mediciones pueden realizarse sobre el carbonato ($\delta^{18}\text{O}_c$) o sobre el fosfato ($\delta^{18}\text{O}_p$). En general, los análisis se realizan sobre el primero en la medida que resulta más barato, simple y fácil que en el fosfato y, muchas veces, viene asociado al análisis de carbono en bioapatita (Miller et al., 2019).

De manera similar, la abundancia isotópica del hidrógeno en los tejidos depende en gran parte del agua consumida, el agua utilizada para la cocción de alimentos y el hidrógeno que compone los enlaces de los macronutrientes de los alimentos (Ehleringer et al., 2008; Sharp, Atudorei, Panarello, Fernández & Douthitt, 2003). En la medida que es posible predecir la composición isotópica del agua meteórica de un lugar según parámetros ambientales como la latitud, altitud, distancia a la costa, cantidad de precipitaciones, temperatura y estación del año, el análisis de las composiciones

isotópicas del oxígeno –principalmente $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ – y el hidrógeno se convierte en un buen indicador del origen geográfico de los individuos (Lightfoot & O’Connell, 2016). La utilización de estas dos relaciones isotópicas ha sido dispar debido a que ambas no pueden medirse sobre el mismo tipo de tejidos. Es muy frecuente medir el $\delta^{18}\text{O}$ en bioapatita ósea o dental, mientras que los valores de $\delta^2\text{H}$ se miden en materia orgánica, con lo cual su uso se ha visto restringido a casos excepcionales dentro de la arqueología a nivel mundial (van der Sluis, Reimer & Ogle, 2019).

Otras relaciones isotópicas de interés: azufre y estroncio

La composición isotópica del azufre ($\delta^{34}\text{S}$) en los tejidos ha demostrado ser útil para la reconstrucción paleodietaria, ya que los valores isotópicos medidos sobre tejidos humanos y animales reflejan los valores de $\delta^{34}\text{S}$ de los recursos consumidos (Nehlich, 2015; Richard, Fuller, Sponheimer, Robinson & Ayliffe, 2003). Asimismo, los valores isotópicos hallados en la base de las cadenas tróficas dependen de la mineralogía y geología local, los gases atmosféricos y los procesos microbiales activos en los suelos (Richards et al., 2003). En arqueología se ha utilizado como indicador de dietas marítimas *versus* dietas terrestres (Richard et al., 2003), dada la composición isotópica homogénea que presentan los océanos (Nehlich, 2015). No obstante, los valores elevados asociados a contextos marítimos pueden no ser el reflejo del consumo de recursos con ese origen, pues puede presentarse el “efecto de pulverización marítima” (*sea spray effect*), generando valores $\delta^{34}\text{S}$ en los suelos de costa similares a aquellos oceánicos. Debido al contraste que existe entre ambientes terrestres y marinos, en el último tiempo estas mediciones han sido utilizadas para mejorar los cálculos de calibración de fechados por efecto reservorio en dietas que contengan porcentajes variables de carbono de distintos reservorios (Sayle et al., 2014).

Por último, resta mencionar el estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), el cual es medido sobre la fracción

mineral de huesos y dientes al igual que el oxígeno y permite discutir aspectos relacionados con la movilidad, migraciones e historias de residencia (Price, Burton & Bentley, 2002; Sealy, van der Merwe, Sillen & Krueger, 1991). A diferencia de los casos anteriores, el ^{87}Sr es radiogénico y varía según la edad y el tipo de sustrato rocoso, por lo que sería esperable que varíe según la geología local. No obstante, en los estudios arqueológicos lo importante es determinar el estroncio biológicamente disponible, el cual puede presentar variaciones respecto de dicho sustrato. El estroncio biológicamente disponible depende de una serie de factores como son los procesos erosivos y meteorización de las rocas, como así también la circulación, transporte y depositación de los sedimentos. La composición isotópica de estroncio no cambia por procesos biológicos una vez ingresada a las cadenas tróficas, debido a la pequeña diferencia en las masas relativas de los isótopos de este elemento (Ericson, 1985). Su incorporación en los tejidos se debe principalmente al consumo de los diferentes recursos, aunque depende del tejido considerado. Diversas especies pueden utilizarse para estimar el estroncio biológicamente disponible: las más usuales son plantas o animales con rangos de acción pequeños, como los roedores (Price et al., 2002).

TEJIDOS Y MATERIALES

Los tejidos y materiales sobre los cuales se pueden realizar análisis de isótopos estables son diversos. Su elección debe efectuarse según las preguntas y objetivos de las investigaciones arqueológicas propuestas.

Tejidos biológicos

En el caso de los restos humanos o animales, las tareas de excavación comúnmente recuperan restos óseos y dentales, debido a su mayor capacidad de preservación en diferentes contextos de depositación. No obstante, existen casos de momificación natural o artificial que permiten recuperar otro tipo de tejidos, tales como pelo, uña y músculo. Los valores de isótopos estables registrados en los distintos tejidos de los organismos refieren, por un lado, al lapso particular de tiempo en el cual este se forma y, por otro, al tipo de crecimiento del tejido en cuestión (Tabla 2). Este es un aspecto importante a considerar, pues cada tejido implica escalas temporales diferentes, las cuales deberán guardar coherencia con el problema de investigación.

Tanto las dos fracciones óseas (colágeno y bioapatita) como el músculo son tejidos que presentan remodelación a lo largo de la vida de los organismos (Ambrose, 1993). La diferencia entre estos es que la composición isotópica de los huesos refleja la dieta de los últimos 10 a 20 años, mientras que la del músculo abarca un lapso temporal mucho más acotado (semanas). Por otro lado, los restantes tejidos (dientes, pelo, uña) no presentan remodelación y la información que se obtiene analizando su composición isotópica puede acotarse al tiempo específico de la formación de ese tejido. De esta manera, los dientes registran momentos relacionados con el nacimiento, niñez y juventud de los individuos, dependiendo de cuál diente se elija. Por su parte, el pelo y las uñas siguen creciendo a lo largo de la vida del individuo. La tasa de crecimiento del pelo es de aproximadamente 1 cm por mes –0,35 mm / día–

Tejido	Resolución Temporal	Metabolismo
Colágeno óseo	Extensa, últimos 10 años	Activo
Bioapatita ósea	Extensa, últimos 10 años	Activo
Músculo	Corta, semanas	Activo
Colágeno diente	Acotada, formación diente	Inerte
Esmalte dental	Acotada, formación diente	Inerte
Pelo	Acotada, 1 cm cada mes	Inerte
Uña	Acotada, 1 cm cada tres meses	Inerte

Tabla 2. Distintos tejidos con sus resoluciones temporales y tipo de crecimiento.

y la de las uñas es de 1 cm cada tres meses –0,10 mm a 0,12 mm / día– (O’Connell, Hedges Healey & Simpson, 2001). De esta forma, si segmentamos el pelo o la uña podríamos observar la evolución de la dieta y el lugar de residencia, mes a mes, durante el lapso determinado por la extensión de los mismos. Es usual combinar el análisis de distintos tejidos para la realización de estudios que se denominan de “historia de vida” (Sealy, Armstrong & Schrire, 1995). Para ello, se utilizan los restos óseos y dentales en conjunto, de forma que pueda establecerse la existencia de cambios en la dieta y/o de lugar de residencia entre la adultez y la juventud/niñez de un individuo.

Residuos orgánicos

Los residuos orgánicos son sustancias resultantes de la actividad humana –intencional o no–, que pueden estar presentes en recipientes cerámicos, artefactos de molienda, instrumentos, entre otros materiales. Algunos de ellos pueden ser visibles al ojo humano debido a su superficialidad o invisibles ya que se encuentran absorbidos en la estructura de los artefactos (Pollard, Batt, Stern, Young & Young, 2007). Existen varias técnicas analíticas que permiten su identificación, pero las más comunes son la caracterización química de lípidos y los estudios de isótopos estables (Skibo, 1992). Por lo general, se analizan los lípidos recuperados de la matriz, ya que perduran a través del tiempo como resultado de sus propiedades hidrofóbicas y, además, se encuentran más protegidos de los efectos de degradación (Malainey, 2011). Estos son el producto de la acumulación de eventos culinarios a lo largo de la vida útil de la pieza. No obstante, también se han desarrollado trabajos que estudian los residuos adheridos en calidad de restos carbonizados macroscópicos que derivan de la combustión de los alimentos, generalmente integrados por los tres macronutrientes de la dieta humana (carbohidratos, proteínas y lípidos) (Horiuchi, Miyata, Kamijo, Cramp & Evershed, 2013). Los análisis de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en residuos adheridos a las paredes internas

de los tiestos cerámicos han demostrado ser una herramienta rápida y económica que permite dar un panorama general de los recursos procesados. Se han aplicado en distintos ambientes para resolver distintas problemáticas, mostrando tener la capacidad de identificar grandes categorías de recursos; como por ejemplo la contribución de plantas C_3 y C_4 a las preparaciones alimenticias o la presencia de recursos de marinos, terrestres y/o de agua dulce (Hart, Lovis, Schulenberg & Urquhart, 2007; Morton & Schwarcz, 2004). No obstante, la lectura de los valores isotópicos de los residuos orgánicos no es sencilla, ya que existen variables que complejizan su interpretación. Por este motivo, es importante el uso de múltiples líneas de evidencias tales como análisis de fitolitos, almidones y caracterización de lípidos, entre otros (Beehr & Ambrose, 2007; Hart, Urquhart, Feranec & Lovis, 2009).

Carbonatos biogénicos

Los isótopos de oxígeno y carbono en los minerales de carbonato de calcio (CaCO_3) que conforman los exoesqueletos de muchos organismos acuáticos proporcionan información paleoclimática y paleoambiental de gran utilidad para los estudios arqueológicos. En particular, la relación entre isótopos de oxígeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) en el carbonato biogénico del caparazón de moluscos fósiles y arqueológicos es empleada en la reconstrucción de los antiguos regímenes de temperatura, precipitación y monzones en ambientes marinos y estuarinos (Prendergast & Stevens, 2014). Esto se debe a que el valor isotópico del oxígeno en el carbonato biogénico (aragonita/calcita) es controlado por variables ambientales como la temperatura del agua circundante y su composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}_w$), esta última, correlacionada positivamente con la salinidad. La relación entre estos factores ha sido expresada en múltiples ecuaciones (Epstein, Buchsbaum, Lowenstam & Urey, 1951; Grossman & Ku, 1986). En los ambientes de latitudes medias y altas, la temperatura del agua constituye el

factor de mayor influencia en los valores $\delta^{18}\text{O}$ del carbonato cálcico de los moluscos, por lo que estos últimos son utilizados como *proxies* de la paleotemperatura de los cuerpos de agua dulce y de la superficie del mar (Epstein et al., 1951; Flores, Gayo, Salazar & Broitman, 2018).

Asimismo, la variabilidad isotópica del oxígeno contenida en el tejido acrecional de los moluscos registra las fluctuaciones térmicas del agua en una escala de tiempo estacional y subestacional (Prendergast & Stevens, 2014). En arqueología, el estudio combinado de los anillos y bandas de crecimiento de la concha (esclerocronología) y su composición geoquímica ofrece la posibilidad de abordar cambios ambientales experimentados por los grupos humanos debido a su corta duración. Asimismo, esta línea de análisis ha sido clave para determinar la estación de la recolección de moluscos a partir del valor $\delta^{18}\text{O}$ del último incremento de sus caparazones, y para discutir, por extensión, las pautas de ocupación humana del espacio (Bailey, Deith & Shackleton, 1983; Colonese et al., 2012).

Sedimentos

La distribución de plantas de tipo C_3 y C_4 , como ya hemos mencionado, está determinada directamente por factores climático-ambientales (Tieszen, 1991). Las proporciones variables de plantas de ambas vías fotosintéticas pueden registrarse en la materia orgánica sedimentaria en cuerpos de agua, paleosuelos y turberas. Entonces, todos estos constituyen registros de variaciones en la distribución de la composición de C_3 y C_4 de una comunidad vegetal dada y pueden ser interpretados en términos de variaciones en las condiciones climático-ambientales. Por su parte, en ambientes acuáticos terrestres, la composición isotópica del carbono de la materia orgánica refleja la composición isotópica promedio de la comunidad vegetal que le dio origen (Meyers, 2003), incluyendo plantas acuáticas y terrestres del área de captación de la cuenca. También influyen fuertemente el nivel de bioproduktividad

acuática y la incidencia de minerales carbonáticos propios de la cuenca hidrogeológica. Dado que los organismos acuáticos toman carbono directamente del *pool* de CO_2 disuelto en agua, un aumento en la bioproduktividad de estos organismos afectará la composición isotópica de dicho *pool* (Cohen, 2003). Esto permite realizar inferencias acerca de cambios en parámetros climático-ambientales que influyen sobre la bioproduktividad acuática, tales como la temperatura y salinidad.

CONSERVACIÓN, CONTAMINACIÓN Y DIAGÉNESIS

Los valores resultantes de los análisis de muestras arqueológicas pueden estar afectados por diagénesis y contaminación. De esta manera, un aspecto relevante es determinar si los valores obtenidos corresponden a la relación isotópica “primaria”, es decir, que sus composiciones isotópicas no se hayan visto afectadas por dichos procesos. En arqueología la fracción más utilizada es el colágeno, pero a medida que aumenta la antigüedad de las muestras, este se degrada y la utilización de la fracción inorgánica se hace inevitable. En estos casos, se recurre a piezas dentales para asegurarse que los valores obtenidos representan la relación isotópica primaria. Los dientes tienen una mayor resistencia a la contaminación debido a que se encuentran recubiertos por el esmalte, con lo que el intercambio con el ambiente de depositación es menor.

Fracción orgánica o colágeno

Existen tres criterios para establecer si los valores isotópicos obtenidos en colágeno óseo representan valores isotópicos fidedignos. El primero, y más importante, es la relación atómica carbono-nitrógeno (C/N), la cual debe encontrarse en el rango entre 2,9-3,6 (De Niro, 1985); si bien algunos autores utilizan un rango más reducido al trabajar con muestras arqueológicas (3,1-3,5, van Klinken, 1999). En el pelo esta relación debe estar dentro del rango 3,0-3,8 (O’Connell & Hedges,

1999). La misma se obtiene a partir de los %C y %N totales, los cuales no siempre son brindados por los laboratorios¹⁴. Diferentes autores vincularon la presencia de valores por encima de dicho rango con muestras que presentaron bajos rendimientos en la obtención del colágeno o contaminación (Ambrose, 1990; van Klinken, 1999). Un segundo criterio consiste en considerar la concentración de carbono y nitrógeno en las muestras analizadas (Ambrose, 1993). Según van Klinken (1999) la proporción de carbono (%C) en el colágeno óseo arqueológico es del $34\% \pm 8\%$, aunque Ambrose (1990) registra un rango de 22,6 a 47% en huesos modernos. Los valores altos fuera de este rango suelen asociarse a la presencia de carbono exógeno –e.g. lípidos–, mientras que los valores más bajos sugieren la presencia de sustancias inorgánicas internas o externas a la muestra en estudio (van Klinken, 1999). De forma similar, la proporción de nitrógeno (%N) del colágeno intacto se encuentra entre 5,5 y 17,3% para huesos modernos (Ambrose, 1990). Por su parte, van Klinken (1999) registró un rango de 11% a 16% de %N en huesos arqueológicos. La proporción de nitrógeno muestra un comportamiento similar al del carbono en huesos con bajo contenido de colágeno (Ambrose, 1990). Un tercer criterio es el rendimiento del colágeno, expresado como un porcentaje del peso inicial de la muestra. El hueso fresco moderno contiene alrededor de 22% de colágeno, aunque el mismo es variable. Ambrose (1990) recupera hasta un 28% de colágeno en huesos modernos. Esta proporción es dependiente de la técnica de extracción de colágeno utilizada (Sealy, Johnson, Richards & Nehlich, 2014). Cuando el contenido de colágeno es menor a 0,5% los contaminantes son difíciles de remover, por lo tanto, el peso mínimo admitido para la medición

isotópica es 1%, siendo observables los casos que se encuentran en el rango entre 0,5 a 1% (Ambrose, 1990, aunque ver criterios en van Klinken, 1999).

Fracción Mineral o Bioapatita

La fracción mineral comprende entre el 65% y el 70% del peso total del hueso. Su componente principal es un fosfato de calcio del grupo de las apatitas, denominado bioapatita. La porosidad de los huesos en comparación con el esmalte dental hace a este tejido más susceptible a la disolución. Sin embargo, se han reportado casos en los que mediciones de $\delta^{13}\text{C}_{\text{apa}}$ en hueso no resultan sistemáticamente alterados a pesar de la exposición a iones exógenos (Koch et al., 2001). Por ejemplo, modificaciones *post mortem* como la recristalización no necesariamente implican cambios en la composición isotópica original, ya que puede resultar de la reorganización interna de la estructura mineral (Lee-Thorp, 2008). Dado que las condiciones postdeposicionales locales determinan gran parte de las causas de intercambio isotópico, cada estudio deberá evaluar las posibles alteraciones isotópicas de la fracción inorgánica en relación con factores como la humedad, la temperatura y el pH de la matriz. También se debe tener en cuenta que hasta los mismos procedimientos de laboratorio para la extracción de la bioapatita generan variaciones isotópicas (Pellegrini & Snoeck, 2016). Finalmente, se recurre a la coherencia de mediciones isotópicas obtenidas como parte de los criterios de control (Kohn & Cerling, 2002; Lee-Thorp, 2008), lo que requiere conocer el grado de variación de la distribución natural de los isótopos en el área de estudio.

Frecuentemente, se utilizan cuatro técnicas para estudiar el estado de las muestras óseas: espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR por sus siglas en inglés), espectroscopía Raman, métodos de fluorescencia (XRF por sus siglas en inglés) y difracción de rayos X (XRD por sus siglas en inglés) (Pollard et al., 2007). Uno de los indicadores más utilizados para estimar la conservación de la bioapatita es

¹⁴ La fórmula se realiza considerando el número másico de los elementos: $C/N = (\%C/12) / (\%N/14)$. De esta manera, si consideramos una situación hipotética de una muestra con un %C de 43 junto a un %N de 15, la relación C/N es de 3,3. Es decir dentro del rango normal establecido (De Niro, 1985). Es importante aclarar que muchas veces los laboratorios informan la relación C/N sin considerar el número másico por lo que las muestras caen fuera del rango normal, pero en realidad es un artefacto de la fórmula utilizada.

el índice de cristalinidad (CI por sus siglas en inglés) generado a través de la FTIR o XRD. El CI permite inferir el tamaño de los cristales de bioapatita. Si bien hay pocos huesos modernos de referencia, los índices obtenidos a través de la FTIR se encuentran en torno a 2,77-3,14 (Wright & Schwarcz, 1996). Un valor muy elevado de CI en especímenes arqueológicos indicaría un crecimiento *post mortem* de los cristales o una disolución selectiva de los más pequeños, con posibles cambios isotópicos asociados. Otros indicadores derivados de la FTIR, como la relación carbonato/fosfato (C/P), proporción de CO₂, proporción de carbonato tipo A/B a fosfato (API y BPI, respectivamente) miden la proporción de carbonatos presentes en el mineral. Estas cifras también pueden compararse con huesos modernos de referencia (Sponheimer & Lee-Thorp, 1999). A su vez, en los espectrogramas se pueden buscar picos correspondientes a otros minerales como la brushita, calcita, fluoroapatita y francolita. La formación de estas fases indicaría pérdida o incorporación de iones, así como reprecipitación mineral, con posibles alteraciones isotópicas asociadas. En suma, no hay una relación unívoca entre procesos diagenéticos, indicadores y el estado del hueso a nivel molecular. Por tal razón, Kohn y Cerling (2002) sugieren prestar atención a la coherencia de las mediciones isotópicas como un criterio de control; por ejemplo, asumir cierto rango esperado de variabilidad y preguntarse si un espécimen con composición isotópica inesperada estaría afectado por la diagénesis. Este sería el punto de partida para generar y evaluar los parámetros reseñados por espectroscopía.

DISCRIMINACIÓN Y FRACCIONAMIENTO ISOTÓPICO

Un concepto importante para la utilización de los análisis de isótopos estables es la diferencia isotópica existente entre el sustrato y el producto, es decir, el *fraccionamiento isotópico*. En arqueología y ecología su denominación es variable, por ejemplo: fraccionamiento trófico, fraccionamiento, factor de discriminación, factor de enriquecimiento o factor de enriquecimiento

trófico, lo que genera cierta confusión. Con estos términos nos referimos a diversas reacciones físico-químicas, como la fijación del carbono por parte de las plantas durante la fotosíntesis, la evaporación de los isótopos del oxígeno durante el ciclo hidrológico o la asimilación del nitrógeno durante la formación del colágeno en los humanos. Siguiendo a Bond y Hobson (2012) corresponde mencionar como *factor de discriminación isotópica* a las reacciones que involucren procesos biológicos, ya que los mismos implican múltiples procesos/reacciones bioquímicas entre el sustrato y el producto. En cambio, *factor de fraccionamiento* debería utilizarse para las diferencias que surgen entre un sustrato y un producto en un proceso que se da en un único paso. Este podría ser el caso de medir el $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en un cuerpo de agua y el vapor resultante de un proceso de evaporación. Estas variaciones ocurren en función de las propiedades físico-químicas de los isótopos y es proporcional a sus diferencias en masa. Una regla importante es que en las reacciones de intercambio los isótopos más pesados crean enlaces que son más difíciles de formar y más difíciles de romper, es decir que hay una concentración diferencial. Es así como, ante la misma energía los isótopos más livianos reaccionan más rápido que los pesados, por lo que la velocidad en la reacción hace que las relaciones isotópicas del producto sean diferentes a las del sustrato (Fry, 2006).

La discriminación isotópica genera que los tejidos de un consumidor reflejen la composición isotópica de la dieta con una diferencia, la cual se simboliza con la letra delta mayúscula (Δ); por ejemplo, en el caso de la composición isotópica del carbono: $\Delta^{13}\text{C}_{\text{consumidor-dieta}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{consumidor}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{dieta}}$. No obstante, dicho factor de discriminación resulta extremadamente variable, dependiendo de factores tales como la relación isotópica analizada (Ambrose, 2000; Ambrose & Norr, 1993), la especie animal considerada (Sponheimer et al., 2003), las características del sistema digestivo (Kelly, 2000; Sponheimer et al., 2003), el tejido y/o componente macromolecular analizado (Kelly, 2000), el estado nutricional y la fisiología particular del organismo analizado (Ambrose, 1991; Sponheimer, et al., 2003), entre muchos

otros condicionantes (Post, 2002). En la Figura 5 se plasman los factores promedio de discriminación isotópica del $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de un ambiente terrestre. En arqueología y ecología la importancia de este concepto radica en poder estimar cuál fue la dieta y los recursos consumidos por los organismos. En el caso del oxígeno se puede calcular el valor de agua consumida a través de diversas ecuaciones de regresión. Como se ha mencionado arriba las mismas son dependientes de la especie en la que estamos interesados en estudiar (Daux et al., 2008; Luz, Kolodny & Horowitz, 1984). Los distintos factores se basan en supuestos que deben ser tenidos en cuenta al usarlos (Wolf, Carleton & Martínez del Rio, 2009). Los errores en su estimación, así como su variabilidad, influye en la incerteza de las reconstrucciones paleodietarias posteriores (Phillips et al., 2014).

En el caso del estroncio en los procesos biológicos, si bien su composición isotópica presenta diferencias dependientes de la masa, la magnitud de estas es muy pequeña. De esta manera, los isótopos del estroncio de los distintos tejidos biológicos no registran cambios a lo largo de toda la cadena trófica (Lewis, Pike, Coath & Evershed, 2017; Price et al., 2002). Algo similar se registra para el $\delta^{34}\text{S}$, con leves diferencias durante los procesos metabólicos (Krajcarz, Krajcarz, Drucker & Bocherens, 2019). De esta manera, si se lo compara con los elementos livianos, estos

presentan diferencias de masa relativas muy pequeñas entre sus isótopos (Lewis et al., 2017; Krajcarz et al., 2019).

INTERPRETACIÓN PALEODIETARIA Y ECOLOGÍA ISOTÓPICA

Dentro de los estudios paleodietarios en arqueología la pregunta más relevante es cómo caracterizar la dieta de un consumidor a partir de la composición isotópica de sus tejidos. Los consumidores de interés pueden ser poblaciones humanas o especies animales. De esta manera, además de tener que caracterizar isotópicamente al consumidor y el factor de discriminación isotópica también resulta fundamental comprender la variabilidad isotópica de los recursos potencialmente consumidos. Este campo de estudio se denomina “ecología isotópica”, entendiéndose por tal a la distribución natural de valores isotópicos de distintas especies animales y vegetales y los factores de discriminación isotópica correspondientes que permiten establecer las relaciones de naturaleza trófica existentes en un ecosistema (Fry, 2006; Weber, Link & Katzenberg, 2002). El acercamiento principal, o más común, es de carácter cualitativo. El mismo se establece a través de diagramas de dispersión cuyos ejes corresponden a los marcadores isotópicos

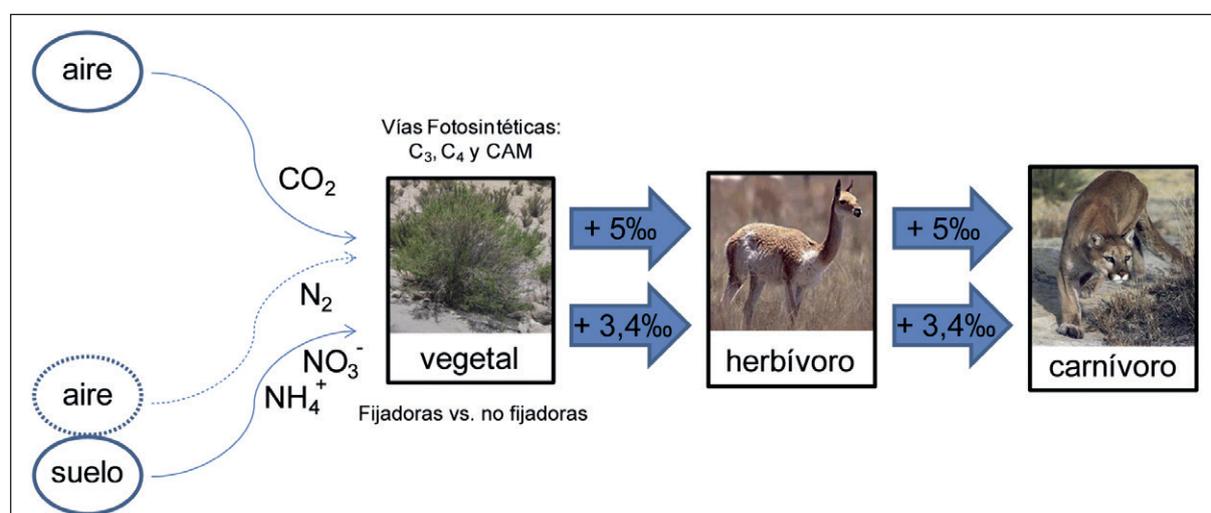


Figura 5. Esquema simplificado de las cadenas tróficas terrestres, contemplando la composición isotópica del carbono (arriba) y del nitrógeno (abajo) y los valores medios de los distintos factores de discriminación para colágeno óseo ($\Delta^{13}\text{C}_{\text{tejido-dieta}}$ y $\Delta^{15}\text{N}_{\text{tejido-dieta}}$ respectivamente). Tomado de Samec (2015).

utilizados. A partir del posicionamiento del consumidor con respecto a los valores isotópicos de los potenciales recursos consumidos es posible realizar inferencias generales acerca de la dieta (Newsome, Martinez del Rio, Bearhop & Phillips, 2007). En la Figura 6 se observan los valores $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ para los recursos potenciales –con media y desvío estándar– del Centro Oeste de la provincia de Santa Cruz durante el Holoceno. Los mismos conforman dos polígonos, el primero con recursos que habitan en la estepa y el segundo, con el huemul, especie de bosque conformando el espacio isotópico denominado Polígono Bosque-Esteba (Tessone, 2010).

$$f_1 = \frac{(\delta^{13}\text{C}_{\text{consumidor}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{planta C4}})}{(\delta^{13}\text{C}_{\text{planta C3}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{planta C4}})}$$

$$f_2 = 1 - f_1$$

Ecuación 1. derivado de modelo de mezcla lineal con un marcador isotópico para estimar la contribución de dos fuentes a la dieta de un herbívoro.

Dichos modelos contienen una serie de supuestos a tener en cuenta al momento de emplearse (Wolf, Carleton & Martinez del Rio, 2009). Entre los más importantes, se asume que la composición elemental de carbono y nitrógeno de

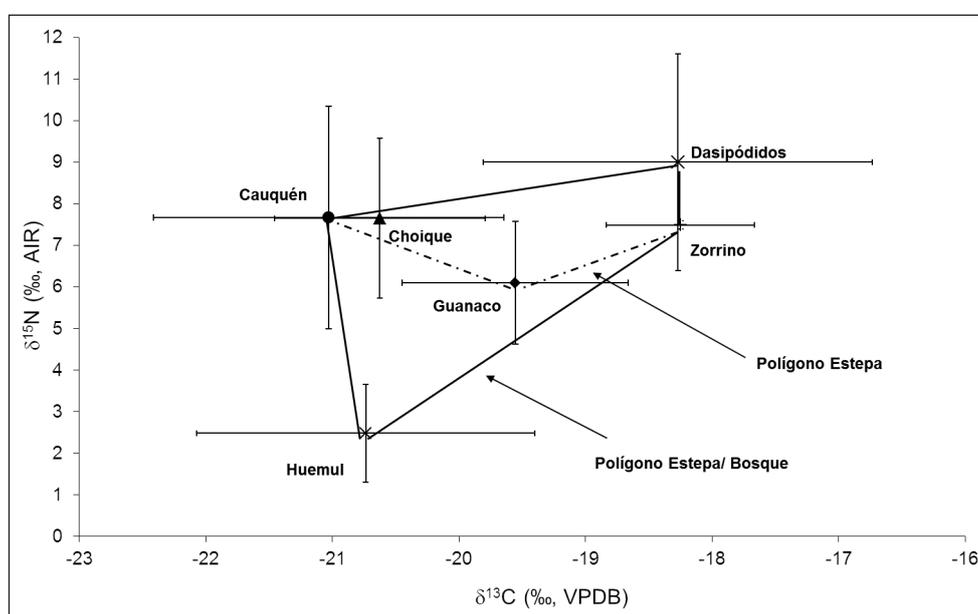


Figura 6. Polígonos de los recursos del centro oeste de Santa Cruz, marco de referencia para interpretación de paleodietas de cazadores recolectores del Holoceno tardío. Tomado de Tessone (2010).

Por otro lado, existen acercamientos cuantitativos que se fundamentan en una serie de ecuaciones, conocidos como modelos de mezcla (*mixing models* en inglés). Con un número n de marcadores isotópicos es posible estimar la contribución proporcional de $n+1$ fuentes a la composición isotópica de un tejido (Phillips, 2012). En Argentina con datos de $\delta^{13}\text{C}$ se ha calculado la proporción en que contribuyen plantas C_3 y C_4 a la dieta de un camélido (Ecuación 1, Killian Galván, Grant, Escola, Panarello & Olivera, 2016a) o el porcentaje de proteínas marinas *versus* terrestres en la dieta de un individuo (Barberena, 2002).

los alimentos es similar (Phillips & Koch, 2002) y que no hay asimilación diferencial (*routing*) de macronutrientes en los tejidos (Boecklen, Yarnes, Cook & James, 2011). Lamentablemente, el análisis de las dietas omnívoras –como es el caso de las dietas humanas– no se adecúa a estos principios, por lo que las interpretaciones de los modelos de mezcla lineal deben dar cuenta de estas limitaciones. Por otra parte, se señala que el uso de valores individuales genera estimaciones que subestiman los efectos de la variación isotópica intragrupal, tanto en los consumidores como en los recursos (Phillips & Gregg, 2001). Otro problema fundamental en las aplicaciones arqueológicas es

la indeterminación. Cuando se desea estimar la contribución de múltiples recursos que superan a la cantidad de marcadores isotópicos disponibles no hay una única solución posible (Parnell, Inger, Bearhop & Jackson, 2010). Una alternativa es la agrupación de recursos. El desafío entonces consiste en agrupar alimentos isotópicamente similares, pero con un criterio coherente para realizar interpretaciones en términos ecológicos o de estrategias de subsistencia (Phillips, Newsome & Gregg, 2005).

A su vez, existen modelos de mezcla bayesianos basados en un enfoque estadístico diferente al frecuentista que permiten trabajar con sistemas indeterminados (Parnell et al., 2013). Estos modelos también contemplan la variabilidad en múltiples parámetros, *i.e.* los factores de discriminación, las mediciones y la composición isotópica de cada grupo de alimentos, entre otros. El resultado informa sobre distribuciones de probabilidad, *i.e.* cuál habría sido la combinación más probable de recursos consumidos dada la composición isotópica medida en la muestra. Dichas distribuciones pueden ser acotadas mediante la inclusión de información *a priori* en los modelos, la cual puede derivarse de otras líneas de evidencia como la zooarqueología. Estas son muy frecuentes en ecología, pero su uso es incipiente en arqueología. En contextos arqueológicos de Argentina se han utilizado SISUS (Giardina et al., 2014), MixSIAR (Bernal, Gonzalez, Gordón & Pérez, 2016; Gil et al., 2017; Gordón, Pérez, Hajduk, Lezcano & Bernal, 2018) y FRUITS (Killian Galván, 2018; Oliszewski et al., 2020; Kochi, 2017). Sólo este último permite modelar los efectos del *routing* (Fernandes, Millard, Brabec, Nadeau & Grootes, 2014; Fernandes, Grootes, Nadeau & Nehlich, 2015). La crítica más importante a estos modelos es que son altamente sensibles a diferencias en los factores de discriminación utilizados (Bond & Diamond, 2011). Esto exige evaluar la robusticidad de los resultados, cambiando los parámetros y comparando su influencia en las estimaciones posteriores (Fernandes, 2015). Por otra parte, se advierte que la capacidad de discriminación de los modelos de mezcla decrece drásticamente a partir de seis fuentes (Phillips et al., 2014), lo

cual también depende de la ecología isotópica (Newsome, Wheatley, Tinker & Yeakel, 2012).

ABORDAJES ISOTÓPICOS DE PROBLEMÁTICAS EN ARQUEOLOGÍA ARGENTINA

a) Paleodieta en cazadores recolectores

Los primeros trabajos de isótopos estables estaban destinados a determinar la dieta y las estrategias de subsistencia de cazadores recolectores en Patagonia (Fernández & Panarello, 1988-1990; Yesner et al., 1991). Posteriormente, los trabajos paleodietarios en cazadores recolectores se han extendido a las diversas regiones del país (Barberena, Berón & Luna, 2018; Barrientos, Catella & Oliva, 2015; Bonomo, Scabuzzo, Politis & Zucol, 2017; Killian Galván, et al., 2016b; Laguens, Fabra, Santos & Demarchi, 2009; Loponte, Acosta & Corriale, 2016; Scabuzzo, Frontini, Vecchi & Bayón, 2016). Estos han sido utilizados para discutir hipótesis surgidas a partir del registro etnográfico y etnohistórico (Barberena, 2004; Yesner et al., 1991), el registro zooarqueológico y arqueobotánico (Barberena, L'Heureux & Borrero, 2004; Ottalagano y Loponte, 2017), otras líneas de evidencia bioarqueológicas (Gómez Otero & Novellino, 2011) o la distribución de materias primas líticas (Borrero, Barberena, Franco, Charlin & Tykot, 2009).

La Patagonia y Tierra del Fuego han sido las áreas con mayor cantidad de trabajos en la aplicación de isótopos estables en cazadores recolectores. Uno de los principales aportes de estos estudios ha sido reconocer la existencia de una gran variabilidad paleodietaria asociada a la diversidad ecológica de la región (Figura 7). La misma se ha manifestado tanto en la escala espacial como en la temporal. Se registraron dietas terrestres, dietas mixtas con diferentes proporciones de recursos marinos y terrestres, dietas marinas y, en el último tiempo, dietas asociadas a recursos obtenidos en el bosque. En la Figura 7 se observa esta variabilidad paleodietaria, con valores bajos de *ca.* -22% y $+7\%$ para $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ respectivamente asociados al bosque andino de Patagonia norte, y valores altos de $\delta^{13}\text{C}$ de -12%

y de $\delta^{15}\text{N}$ de +17‰ para ambientes marinos de la costa atlántica; también se puede observar que las dietas terrestres esteparias pueden ser definidas entre -20‰ y -18‰ en el $\delta^{13}\text{C}$ y entre +11‰ y +13‰ en el $\delta^{15}\text{N}$. De esta manera, se observa una gran diversidad de estrategias de subsistencia implementadas por los cazadores recolectores de Patagonia durante el Holoceno.

la alimentación cotidiana de las poblaciones. Esta línea de evidencia fue utilizada particularmente en el Centro Oeste Argentino (COA) y en el Noroeste Argentino (NOA).

En el caso del COA, este fue usualmente considerado el área límite para la distribución del maíz en los Andes. El análisis de los valores $\delta^{13}\text{C}$ permitió discutir la importancia del consumo del

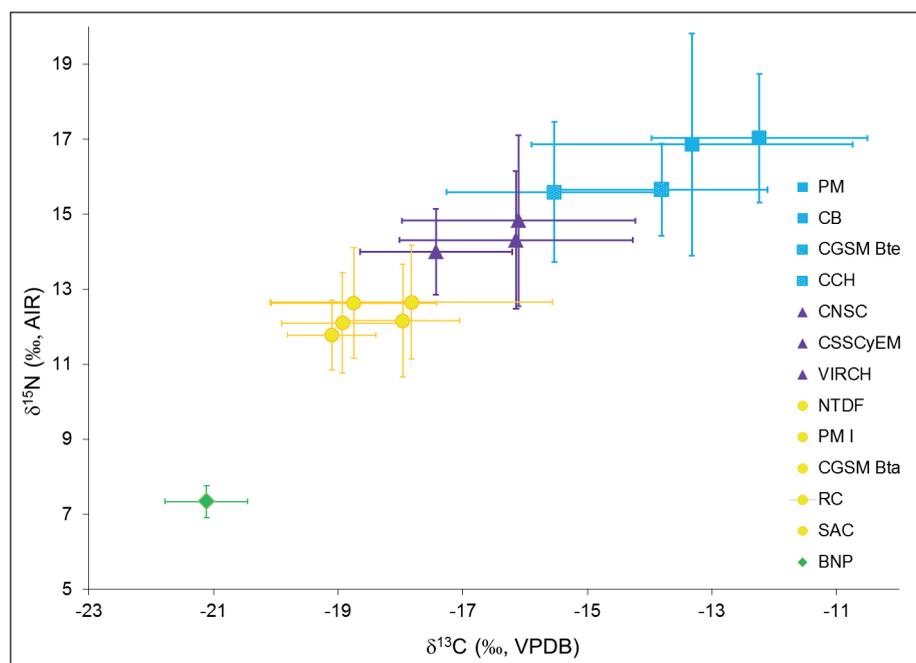


Figura 7. Distribución de valores $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en restos humanos de Patagonia. Referencia: PM: Península Mitre (Yesner et al., 1991; Panarello et al., 2006); CB: Canal Beagle (Panarello et al., 2006); CGSM Bte: Costa Golfo San Matías Bloque Temprano (Favier Dubois et al., 2010); CCH: Costa Chubut (Gómez Otero, 2007); CNSC: Costa Norte Santa Cruz (Zilio, Tessone & Hammond, 2018); CSSCyEM: Costa Sur de Santa Cruz y Estrecho de Magallanes (Borrero et al., 2001; Barberena, 2002); VIRCH: Valle Inferior Río Chubut (Gómez Otero, 2007); NTDF: Norte de Tierra del Fuego (Barberena, 2004; Guichón, Borrero, Prieto, Cárdenas & Tykot, 2001); PM I: Patagonia Meridional Interior (Borrero et al., 2001; Barberena, 2002); CGSM Bta: Costa Golfo San Matías Bloque tardío (Favier Dubois et al., 2010); RC: Río Colorado (Flensburg et al., 2018, 2020); SAC: Sierra Colorada (Tessone, García Guraieb, Goñi & Panarello, 2015); BNP (Fernández & Tessone, 2014; Perez et al., 2019).

b) Introducción del maíz en la dieta humana

Una de las líneas de investigación más importantes en la aplicación del análisis de isótopos estables en arqueología es el estudio de la domesticación y producción de plantas por las economías en el pasado (e.g. maíz, mijo). A diferencia de otros indicadores, como el estudio de macro y micro restos vegetales, la medición en los tejidos humanos proporciona un indicador claro sobre la importancia de estos recursos dentro de

maíz en las dietas de las sociedades prehispánicas a través del tiempo. Los resultados destacan un consumo variable de este cereal durante los últimos 2000 años, vinculado entre otros aspectos con variaciones climáticas ambientales (Gil, Neme & Tykot, 2010; Gil et al., 2014a).

Por su parte, en el caso del NOA, la aplicación de estas técnicas permitió cuestionar al desarrollo agrícola como una tendencia progresiva, lineal y finalista, así como también la visión del maíz

como un alimento intrínsecamente más rendidor y/o más estable respecto a otro tipo de recursos alimenticios (Killian Galván, 2015). El análisis simultáneo de sitios arqueológicos en las diferentes ecorregiones del NOA (Figura 8) permitió discutir en qué condiciones tuvo lugar la intensificación en la producción de este cereal y su consecuente consumo. Estos estudios han destacado que las diferencias climáticas en la estación de crecimiento que presentan las diferentes ecorregiones del NOA han sido una variable de importancia en el consumo y producción de los recursos vegetales y animales por parte de las poblaciones (Killian Galván, 2015). Una estación de crecimiento con temperaturas elevadas, como es el caso de las áreas valliserranas (e.g. Quebrada de Humahuaca y Valle de Ambato; Gordillo & Killian Galván, 2017; Killian Galván et al., 2014), habría favorecido el desarrollo agrícola, con dietas donde el maíz jugó un rol de mayor importancia (Figura 8). En las áreas restantes, tanto la Puna Norte como Sur, su aporte fue menor, y se privilegió otros recursos vegetales o animales, como tubérculos y camélidos (Killian Galván, 2018).

desarrollo dispar en Argentina. Hasta el momento, se ha utilizado mayormente el oxígeno (Berón, Luna & Barberena, 2013; Gil et al., 2014b; Serna, Salazar-García, Valenzuela & Prates, 2020a; Ugan et al., 2012) y solo unos pocos trabajos han utilizado estroncio para evaluar la movilidad en sociedades humanas (Barberena et al., 2017, Barberena et al., 2019, Barberena, et al., 2020; Serna, Prates, Mange, Salazar-García & Bataille, 2020b). En líneas generales, podemos distinguir dos estrategias dentro de este tipo de estudios. La primera busca reconocer casos anómalos en un grupo. Los valores que se escapan al comportamiento medio del conjunto bajo análisis serían los individuos no locales, por lo que son identificados como migrantes o individuos que en algún momento de su vida –dependiendo del tejido analizado– vivieron en otra región (Berón et al., 2013). La segunda estrategia implica el análisis de valores referencia $-\delta^{18}\text{O}$ en aguas o $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en distintos roedores o plantas– para lograr, no solo identificar los casos anómalos, sino tratar de acotar la región de procedencia de ese individuo no local (Barberena et al., 2019; Gil et al., 2014b; Serna et al., 2020b).

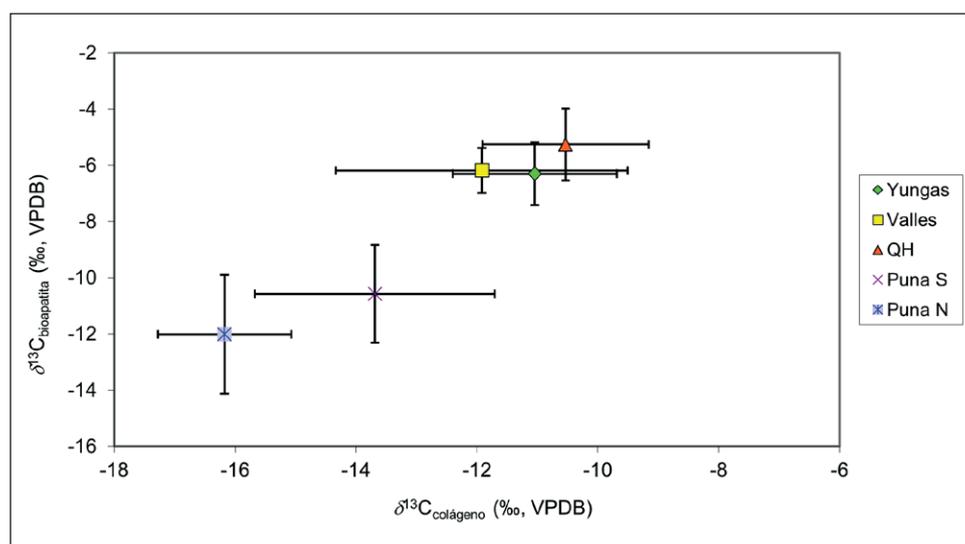


Figura 8. $\delta^{13}\text{C}$ sobre colágeno y bioapatita en restos correspondientes a individuos adultos del NOA según su procedencia geográfica: Yungas (Jujuy), Valles mesotermales (Catamarca y Salta), Quebrada de Humahuaca (QH; Jujuy), Puna Norte (Jujuy) y Puna Sur (Catamarca). Tomado de Killian Galván (2015).

c) Movilidad y Migración

El uso de la composición isotópica del oxígeno y el estroncio para estudiar la movilidad y la migración de los grupos humanos ha tenido un

Un caso interesante a mencionar, por el volumen de información y trabajos que se registran, es el de la movilidad de las poblaciones humanas del Centro Oeste de la Argentina con

los isótopos estables del oxígeno y el estroncio (Barberena et al., 2017; Barberena et al., 2019; Gil et al., 2014b; Ugan et al., 2012). A partir del $\delta^{18}\text{O}$ en restos óseos y dentales, como también en aguas del área, se observó cierta homogeneidad en los valores $\delta^{18}\text{O}$ en individuos recuperados en distintas regiones del COA, lo que llevó a plantear una alta movilidad de los grupos que hizo que promedien los valores de las diferentes fuentes de agua (Gil et al., 2014b; Ugan et al., 2012). No obstante, a partir de estudios recientes de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ –en los mismos sectores en los que fueran medidos estos valores $\delta^{18}\text{O}$ – se observó una situación contraria, con una mayor variabilidad en los valores de estroncio y sin que las señales de las distintas áreas se solapen, permitiendo pensar por el contrario en una movilidad más reducida de los grupos humanos (Barberena et al., 2017; Barberena et al., 2019). Esto estaría poniendo en evidencia que la *performance* de cada par isotópico es de carácter regional y parte de la tarea metodológica es evaluar los niveles de resolución de los marcadores isotópicos en las distintas áreas bajo estudio. Por último, a partir de la combinación de distintas líneas de evidencia se ha identificado un grupo de migrantes en el valle de Uspallata, Mendoza antes de la llegada del imperio incaico a dicha provincia; destacando la presencia de valores estroncio no locales y dietas con un fuerte componente C_4 –i.e. maíz– en el sitio Potrero Las Colonias (Barberena, et al., 2020).

d) Zooarqueología

Los estudios de isótopos estables en zooarqueología han crecido en el último tiempo. Los objetivos de este tipo de aproximaciones han sido estudiar la relación de las especies faunísticas y las poblaciones humanas a través del tiempo, inferir las características del ambiente para diversos momentos del Pleistoceno y Holoceno, evaluar la distribución de las diferentes especies en el pasado y discutir aspectos relacionados a la biología de la conservación (Zangrando et al., 2014).

En el ambiente marino de la Patagonia argentina, las investigaciones apuntaron a establecer cambios temporales en las cadenas tróficas, sea por la interacción con las poblaciones humanas en

distintos momentos de la historia o por cambios climático-ambientales que la podrían haber afectado (Bas et al., 2019). Al mismo tiempo, algunos investigadores han incursionado en el estudio de los hábitos de las especies en función de las variaciones en el carbono y el nitrógeno en el ambiente marino (*nearshore/offshore*) a lo largo del Holoceno y sus implicaciones para conductas humanas en el pasado (Kochi et al., 2018; Zangrando, Ricciardelli, Kochi, Nye & Tessone, 2016). Si bien la escala temporal de estos trabajos es variable, usualmente buscan integrar la situación actual de las especies estudiadas, siendo el registro arqueológico un reservorio de información del ambiente marino previo a la era industrial, con las consiguientes modificaciones producto de la pesca y caza a gran escala. En el canal Beagle se ha discutido cómo la presión predatoria de los cazadores recolectores afectó los valores isotópicos de lobos marinos (Nye, Zangrando, Martinoli & Fogel, 2020) o cómo los valores en peces reflejan cambios en los ambientes de aprovisionamiento de los cazadores recolectores (Zangrando et al., 2016).

En el ámbito terrestre, por su parte, se desarrollaron estudios isotópicos sobre el venado (Loponte & Corriale, 2020), guanaco (Barberena et al., 2009b; Gil et al., 2019; Kochi et al., 2020; Loponte & Corriale, 2020; Tessone, Rindel, Belardi, Panarello & Goñi, 2014a) y huemul (Barberena, Méndez, Mena & Reyes, 2011; Fernández & Tessone, 2014; Méndez, Barberena, Reyes & Nuevo Delaunay, 2014; Tessone, Fernández, Bellelli & Panarello, 2014b; Tessone, Fernández, Fernández & De Nigris, 2020a) entre otros. Los mismos buscan entender la variabilidad espacial y temporal de los valores obtenidos en los restos y su vinculación con variables climático-ambientales. En el caso del huemul, se han discutido aspectos relacionados con la distribución pasada de la especie y como esta ha sido afectada por la colonización del oeste de la Patagonia por parte de los Estados-nación de Chile y Argentina (Barberena et al., 2011; Tessone et al., 2020a).

Asimismo, durante el Pleistoceno final se produjo la extinción de diversas especies de mega, meso y microfauna en Sudamérica; sobre lo que

se discute la importancia relativa de los humanos y el ambiente en dicha extinción. El trabajo pionero de Fernández y coautores (1991) mostró el potencial de la interacción entre diferentes indicadores, entre ellos $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$, en el estudio de las ocupaciones humanas y fauna extinta en el NOA. Trabajos posteriores utilizaron valores de carbono y oxígeno sobre carbonatos procedentes de materiales óseos o dentales de fauna extinta en el área de la Pampa argentina para comprender aspectos paleocológicos (Prado, Alberdi, Azanza & Sánchez, 2001; Sánchez, Prado & Alberdi, 2006). Se destacan los trabajos sobre caballos del Pleistoceno, tanto del género *Equus* como *Hippidion* (Prado, Sánchez & Alberdi, 2011; Prado & Alberdi, 2017). Asimismo, se ha estudiado la composición isotópica del carbono y el nitrógeno en colágeno óseo de fauna extinta, muchas veces recolectada en sitios arqueológicos y/o vinculados a los fechados radiocarbónicos (Bocherens et al., 2016, 2017; Pradeiro et al., 2012; Prevosti & Schubert, 2013; Steele & Politis, 2009). En relación con *Xenarthras*, los isótopos estables han sido utilizados para discutir los hábitos de herbivoría de las distintas especies de este género (Bocherens et al., 2017, 2018; Czerwogora, Fariña & Tonni, 2011; Fariña & Varela, 2018). En Patagonia, si bien la mayoría de las muestras provienen del sector chileno, se destaca el estudio de la paleoecología de los depredadores del Pleistoceno final (Prevosti & Martin, 2013) y variaciones en el

ciclo del ^{15}N en herbívoros durante el Pleistoceno final y la transición al Holoceno (Rabanus-Wallace et al., 2017). A su vez, en la meseta central de Santa Cruz, se han presentado valores $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ sobre diversas especies de fauna extinta (Paunero, Valida, Rindel & Tessone, 2017; Tessone, Miotti, Marchionni, Hermo & Mosquera, 2020b).

Por último, asociado al registro zooarqueológico, los isótopos estables también han sido aplicados al estudio de las estrategias de pastoreo de las sociedades andinas. Desde temprano los análisis mostraron la existencia de una correlación negativa entre la altitud y los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en colágeno óseo de camélidos silvestres y domésticos de la Puna jujeña (Fernández & Panarello, 1999-2001a, 1999-2001b; Samec, Yacobaccio & Panarello, 2018; Yacobaccio, Morales & Samec, 2009). Estos resultados se explican por la distribución diferencial de las especies vegetales con vías fotosintéticas C_3 y C_4 en función de la altitud (Samec 2014; Samec, Yacobaccio & Panarello, 2017). Posteriormente, este patrón se ha complementado con la correlación entre el $\delta^{15}\text{N}$ y la altitud, debido a su vinculación con las variaciones con la humedad (Samec et al., 2017). Estas tendencias han permitido evaluar y discutir los rangos altitudinales ocupados por los pastores durante el Holoceno tardío a partir de los análisis de composición isotópica del carbono y el nitrógeno en contextos arqueológicos (Figura 9) (Samec, Pirola, Yacobaccio & Panarello, 2020; Yacobaccio, Samec & Catá, 2010). Asimismo,

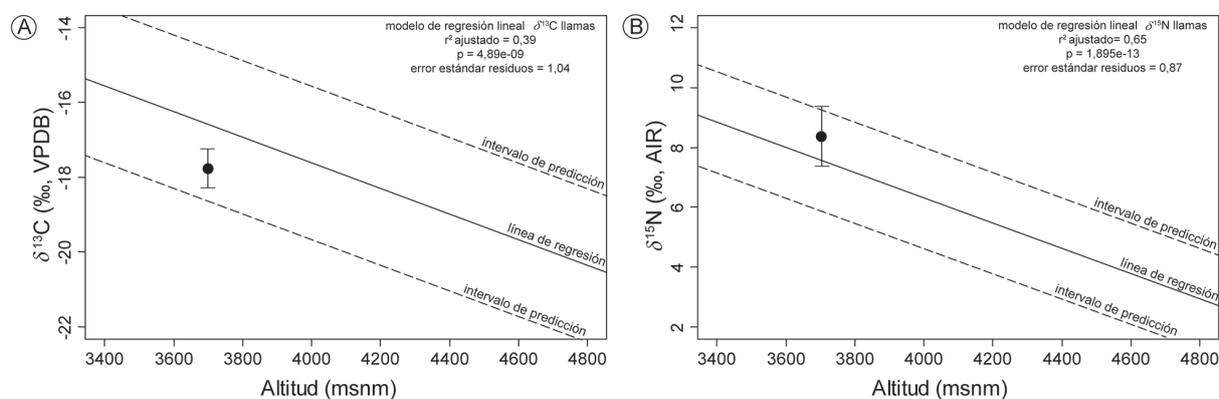


Figura 9. Representación de las medias (y desviaciones estándar) de los valores isotópicos medidos sobre colágeno óseo de los materiales recuperados en Cueva Chayal en relación con los modelos de regresión lineal según la altitud creados a partir del análisis de materiales modernos (Samec et al., 2018). A) Media (y desviación estándar) del grupo grande según el modelo de regresión lineal para valores de $\delta^{13}\text{C}$ de llamas modernas, B) Media (y desviación estándar) del grupo grande según el modelo de regresión lineal para valores de $\delta^{15}\text{N}$ de llamas modernas.

partiendo de la ecología isotópica propuesta en el área se han estudiado diversas problemáticas tales como la explotación de camélidos silvestres durante la primera parte del Holoceno en la Puna de Catamarca (Grant, Mondini & Panarello, 2018), las estrategias de manejo de rebaños durante el primer milenio AD en diferentes contextos arqueológicos del área valliserrana de Salta y Catamarca (Dantas, Figueroa, Laguens & Izeta, 2014; Izeta, Laguens, Marconetto & Scattolin, 2009) y las estrategias de caza y pastoreo en contextos incaicos de valles y quebradas de Salta y Jujuy (Mengoni Goñalons, 2007, 2015), solo por mencionar algunos. Recientemente se ha introducido el análisis de estroncio para evaluar hipótesis acerca de la gestión de rebaños de camélidos en el Valle de Ambato (Dantas & Knudson, 2016).

e) Historias de vida

En el país aún son pocos los trabajos de historias de vida (*sensu* Sealy et al., 1995). Se destacan los estudios a través de la segmentación de pelo de individuos que participaron de rituales y sacrificios durante el imperio incaico (Fernández, Panarello & Schobinger, 1999; Killian Galván, Tessone, Valenzuela, Sharp & Panarello, 2020; Sharp et al., 2003; Wilson et al., 2007). Las *capacochas* fueron sacrificios de individuos, generalmente

niños o adolescentes, realizados en santuarios de altura luego de largos peregrinajes. Algunas de estas *capacochas* han sido objeto de análisis de isótopos estables realizados sobre el pelo de los individuos sacrificados, tales como las momias del Aconcagua (Fernández et al., 1999; Panarello, Valencio & Schobinger, 2003), Lulluillaco (Wilson et al., 2007) y el cerro Chuscha (Killian Galván et al., 2020; Panarello et al., 2003), incluyendo el análisis simultáneo de isótopos del carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y azufre. Estos estudios han permitido evaluar cambios en la dieta y la movilidad durante los últimos dos años de vida de los individuos sacrificados. En la Figura 10 se puede observar el cambio de una dieta predominantemente C_3 a una C_4 en el último año de vida del individuo sacrificado en el Cerro Chuscha, integrada seguramente por preparaciones a base de maíz. Este cambio registrado en el pelo implica una modificación de la dieta de esta persona a medida que se acercaba el sacrificio en el santuario de altura (Killian Galván et al., 2020). Asimismo, a partir de la comparación de los distintos casos disponibles en la bibliografía, Killian Galván y coautores (2020) han puesto en duda el carácter centralizado de esta práctica ceremonial del imperio incaico, señalando múltiples trayectorias en las historias de vida de estos individuos.

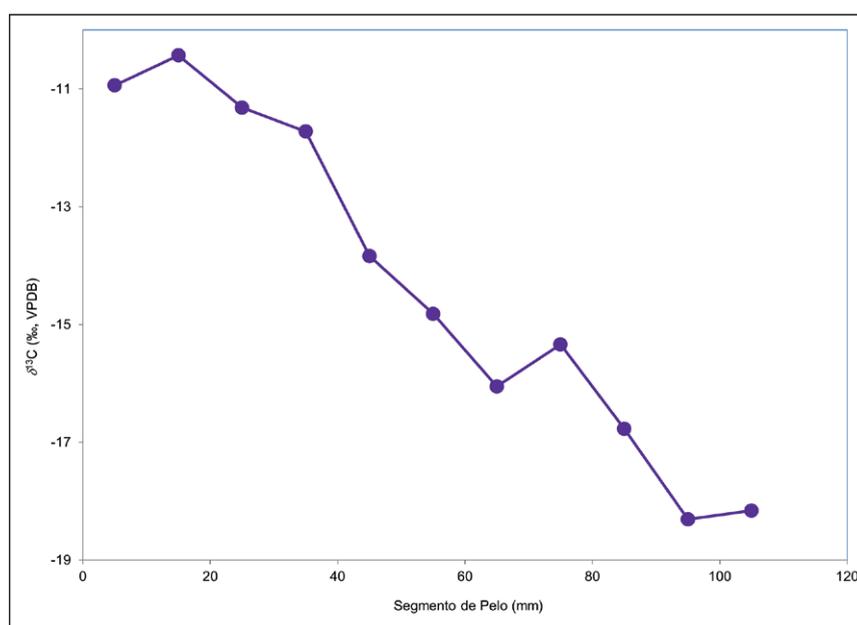


Figura 10. Dieta del individuo sacrificado del monte Chuscha a través del análisis de pelo segmentado, se observa el cambio de una dieta basada en cadenas tróficas C_3 a C_4 . Tomado de Killian Galván et al. (2020).

f) Preparación y cocción de alimentos

Fernández y coautores (1992) fueron pioneros en el estudio isotópico de residuos adheridos en las piezas cerámicas con el fin de identificar los recursos procesados y comprender los sistemas de subsistencia de las poblaciones, siendo su área de interés la Puna jujeña. Dos décadas después en la misma región, se usó esta técnica para estudiar el rol del maíz en la alimentación de las poblaciones en el Noroeste de la Argentina (Lantos, 2014; Lantos, Spangenberg, Giovannetti, Ratto & Maier, 2015). Asimismo, se analizaron cambios y continuidades en las prácticas de preparación y consumo de este cereal con relación a los cambios sociopolíticos sucedidos entre los siglos III y XVI DC (Lantos, 2014; Lantos et al., 2015). Esta línea también fue aplicada en sitios arqueológicos del noreste de la Argentina para indagar sobre los usos de la cerámica y la subsistencia de estas poblaciones (González & Frère, 2017; Ottalagano, 2019). En Patagonia, de manera más continua, se han usado los análisis isotópicos para la identificación de recursos cocinados en contenedores de cerámica, los cuales demostraron que variaron de acuerdo con el área de estudio. En la costa norte de Chubut, esta tecnología fue utilizada para procesar mezclas de recursos vegetales C_3 , animales terrestres consumidores de plantas C_3 y, en menor medida, recursos marinos (Gómez Otero, 2007; Gómez

Otero, Constenla & Schuster, 2014), mientras que en el centro-oeste de Santa Cruz se procesaron mayormente animales terrestres (Chaile, Lantos, Maier, Cassiodoro & Tessone, 2018a). En los sitios del bosque y ecotono del sur de Río Negro y norte de Chubut, los recipientes cerámicos fueron utilizados para cocinar animales terrestres provenientes del bosque, como por ejemplo roedores y huemules (Chaile et al., 2018a). Finalmente, valores $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$ en sitios arqueológicos ubicados en la estepa santacruceña han señalado la cocción de animales de la estepa (Figura 11) (Cassiodoro & Tessone, 2014; Chaile et al., 2018a; Chaile, Tessone, Cassiodoro, Bellelli & Belardi, 2018b; Cirigliano, Montenegro, Franco, Brook & Cherkinsky, 2019). Estos resultados, juntos con la caracterización química de lípidos, permitieron inferir el uso de la cerámica para la obtención de grasa de guanaco entre los grupos cazadores recolectores del centro-oeste de Santa Cruz (Chaile et al., 2018a, 2018b).

g) Paleoambiente y Paleotemperaturas

El análisis de isótopos estables del carbono en sedimento se ha utilizado para explicar diferencias en la distribución de plantas C_3 y C_4 en diversos momentos del Holoceno (Silva et al., 2011). Asimismo, la influencia de la abundancia de humedad en la composición isotópica de la vegetación C_3 ha sido utilizada para explicar

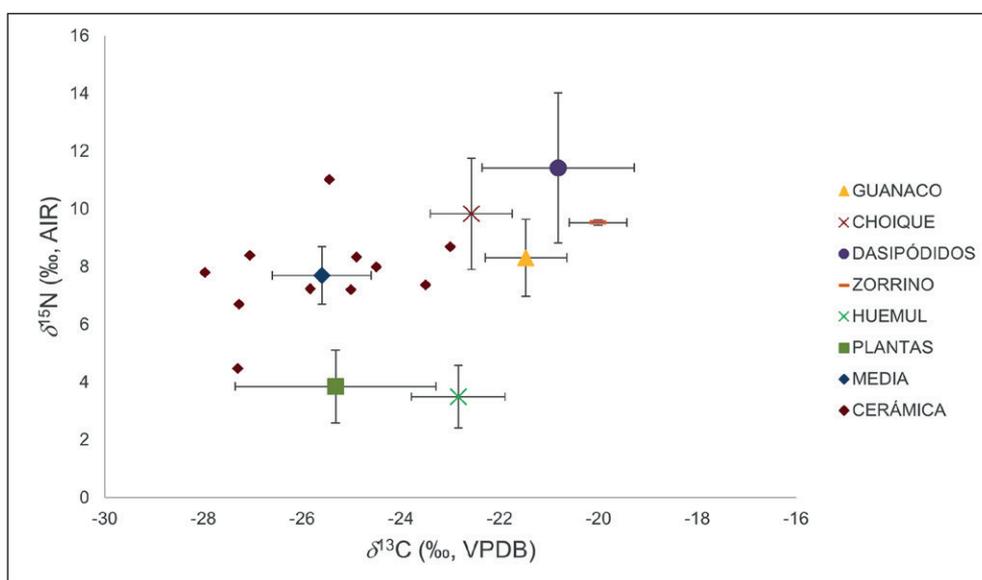


Figura 11. Valores de $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$ de residuos adheridos a tiestos cerámicos del centro-oeste de Santa Cruz y de la ecología isotópica del área. Tomado con modificaciones de Chaile et al. (2018b).

patrones altitudinales en los valores $\delta^{13}\text{C}$ de materia orgánica en turbas y paleosuelos de la Puna argentina (Morales, Pirola & Samec, 2015; Schitteck et al., 2016). En el caso de los ambientes acuáticos terrestres, se han realizado estudios en cuerpos de agua para el estudio de paleoambientes del Pleistoceno y Holoceno en distintos contextos de Argentina, tales como en lagos patagónicos (e.g. Fey et al., 2009; Markgraf et al., 2003), en lagunas de la Puna catamarqueña (Valero-Garcés, Delgado-Huertas, Ratto, Navas & Edwards, 2000) y en la región Pampeana (Piovano, Ariztegui, Bernasconi & McKenzie, 2004). Asimismo, se han desarrollado algunos trabajos de enfoque paleoclimático, que incluyen el uso de los valores $\delta^{18}\text{O}$ para inferir paleotemperaturas y la incidencia relativa de la evaporación en la Puna (Fernández et al., 1991, Olivera, Tchilinguirian & Grana, 2004) y en la región Pampeana (Piovano et al., 2004).

Por otro lado, en la Patagonia Argentina, se ha estudiado la composición isotópica del oxígeno en el carbonato de los exoesqueletos de moluscos arqueológicos para reconstruir las paleotemperaturas del agua superficial en la costa Atlántica y costa sur de Tierra del Fuego. Los trabajos pioneros se desarrollaron en el canal Beagle. Primero, a partir de mediciones de $\delta^{18}\text{O}$ en muestras arqueológicas de moluscos procedentes del sitio Túnel I (Panarello 1987). En segundo término Obelic y coautores (1998) establecieron una curva de paleotemperaturas para el canal Beagle durante los últimos 6000 años ^{14}C AP a partir de los valores isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$) en muestras arqueológicas de *Mytilus edulis*. La dinámica estacional de las aguas del canal Beagle en el pasado también ha sido discutida a fines de evaluar la estacionalidad en la explotación antrópica de los recursos costeros (Obelic, Álvarez, Argullós, & Piana, 1998). Esto se ha logrado a partir de la medición de valores $\delta^{18}\text{O}$ sobre las líneas de crecimiento de lapas modernas y arqueológicas del canal Beagle (Colonese et al., 2012; Nicastro et al., 2020). Por su parte, Favier Dubois y coautores (2010) exploraron las fluctuaciones de valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en muestras arqueológicas de mejillones y analizaron variaciones de la temperatura superficial del agua de mar y en

productividad del ambiente marino costero de Patagonia septentrional durante el Holoceno medio y tardío. En conjunto, estos datos sugieren tendencias semejantes en la paleotemperatura del agua marina durante la ocupación humana de la región (Favier Dubois, Borella & Tykot, 2010). Por último, en trabajos más recientes del canal Beagle, el estudio combinado de isótopos estables y esclerocronología en especímenes arqueológicos de moluscos ha permitido abordar las oscilaciones climáticas del Holoceno medio y tardío con un mayor grado de resolución temporal y detectar cambios diacrónicos en el patrón estacional de fluctuaciones térmicas del agua de mar superficial (Gordillo, Brey, Beyer & Lomovasky, 2015).

CONSIDERACIONES FINALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Este trabajo presentó una síntesis sobre los fundamentos, conceptos y herramientas utilizadas en la aplicación de isótopos estables en arqueología, con especial énfasis en el desarrollo de esta metodología en la Argentina, la cual tiene aproximadamente unos 35 años de historia. Este ámbito muestra un notable crecimiento y dinámica en el país, acompañando el desarrollo a nivel mundial. En el marco de esta dinámica, aunque los resultados todavía son escasos, se ha empezado a desarrollar nuevas aplicaciones en el ámbito académico nacional que queremos mencionar. En primera instancia, en el área de la Antropología Forense, está comenzando la aplicación de análisis de isótopos estables para colaborar en la identificación de personas sin identidad conocida (NN) (Sandoval, 2019; Valenzuela, 2017). Segundo, referido al estudio de la dieta y nutrición de individuos en la actualidad en el marco de estudios de antropología nutricional (Valenzuela, et al., 2018). Tercero, la aplicación de la técnica GC-C-IRMS en residuos absorbidos en cerámica es una vía prolífica para identificar con mayor precisión los recursos alimenticios, que ya ha empezado a utilizarse en el NOA (Lantos, et al., 2015). A futuro se busca ampliar este campo de estudio y aplicar esta técnica también en Patagonia,

con el fin de profundizar el conocimiento acerca de la adopción de la cerámica en grupos cazadores recolectores del centro-oeste de Santa Cruz (Chaile, et al., 2018b). Como reflexión final, destacamos el esfuerzo que ha llevado posicionar a la Argentina como promotora de la aplicación de metodologías basadas en los análisis isotópicos en Latinoamérica, siendo primero INGEIS y ahora también el LIECA (UNCuyo-CONICET), instituciones formadoras de investigadores y recursos humanos especializados en esta técnica. Este reconocimiento es fruto del diálogo fraterno entre campos disciplinares que muchas veces se presentan como alejados: las humanidades y las ciencias naturales. Lejos de ello, han demostrado potenciarse de manera mutua cuando se persiguen objetivos comunes. Este intercambio estimula una reflexión continua sobre los alcances y limitaciones de las diferentes líneas de evidencia, enriqueciendo discusiones teórico-metodológicas acerca de las unidades de análisis y las escalas adecuadas para caracterizar los procesos socio-económicos que ocurrieron en el pasado.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a los compañeros y compañeras de INGEIS que han colaborado con el desarrollo de este grupo de trabajo. Un recordatorio muy especial para Susana Valencio quien fue una persona clave en el surgimiento de este grupo. Por último, a los evaluadores por las sugerencias y comentarios que mejoraron el manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

Ambrose, S. H. (1990). Preparation and Characterization of Bone and Tooth Collagen for Isotopic Analysis. *Journal of Archaeological Science*, 17(4), 431-451.

Ambrose, S. H. (1991). Effects of Diet, Climate and Physiology on Nitrogen Isotope Abundances in Terrestrial Foodwebs. *Journal of Archaeological Science*, 18(3), 293-317.

Ambrose, S. H. (1993). Isotopic Analysis of Paleodiets Methodological and Interpretive Considerations. En M. K. Sandford (Ed.), *Investigations of Ancient Human Tissue: Chemical Analyses in Anthropology* (pp. 59-130). Langhorne: Gordon and Breach Science Publishers.

Ambrose, S. H. (2000). Controlled Diet and Climate Experiments on Nitrogen Isotope Ratios of Rats. En S. H. Ambrose & M. A. Katzenberg (Eds.), *Biogeochemical Approaches to Paleodietary Analysis* (pp. 243-259). Springer: US.

Ambrose, S. H. & Norr, L. (1993). Experimental Evidence for the Relationship of the Carbon Isotope Ratios of Whole Diet and Dietary Protein to Those of Bone Collagen and Carbonate. En J. B. Lambert & G. Grupe (Eds.), *Prehistoric Human Bone: Archaeology at the Molecular Level* (pp. 1-37). Springer: US.

Bailey, G., Deith, M. & Shackleton N. (1983). Oxygen Isotope Analysis and Seasonality Determinations: Limits and Potential of a New Technique. *American Antiquity*, 48(2), 390-398.

Balasse, M. & Tresset, A. (2002). Early Weaning of Neolithic Domestic Cattle (Bercy, France) Revealed by Intra-tooth Variation in Nitrogen Isotope Ratios. *Journal of Archaeological Science*, 29, 853-859.

Barberena, R. (2002). *Los límites del mar: isótopos estables en Patagonia meridional*. Buenos Aires: Sociedad Argentina de Antropología.

Barberena, R. (2004). Arqueología e isótopos estables en Tierra del Fuego. En L. A. Borrero & R. Barberena (Eds.), *Temas de Arqueología. Arqueología del norte de la Isla Grande de Tierra del Fuego* (pp. 132-169). Buenos Aires: Editorial Dunken.

Barberena R., G. L. L'Heureux & L. A. Borrero 2004. Expandiendo el alcance de las reconstrucciones de subsistencia. Isótopos estables y conjuntos arqueofaunísticos. En M. T. Civalero,

- P. M. Fernández & A. G. Guráieb (Eds.), *Contra Viento y Marea. Arqueología de Patagonia* (pp. 417-433). Buenos Aires: INAPL-SAA.
- Barberena, R., Gil, A. F., Neme, G. A. & Tykot, R. H. (2009a). Stable Isotopes and Archaeology in Southern South America. Hunter-Gatherers, Pastoralism and Agriculture: An Introduction. *International Journal of Osteoarchaeology*, 19(2), 127-129. <https://doi.org/10.1002/oa.1063>
- Barberena, R., Zangrando, A. F., Gil, A., Martínez, G. A., Politis, G., Borrero, L. A. & Neme, G. A. (2009b). Guanaco (*Lama guanicoe*) Isotopic Ecology in Southern South America: Spatial and Temporal Tendencies, and Archaeological Implications. *Journal of Archaeological Science*, 36(12), 2666-2675.
- Barberena, R., Méndez, C., Mena, F. & Reyes, O. (2011). Endangered Species, Archaeology, and Stable Isotopes: Huemul (*Hippocamelus bisulcus*) Isotopic Ecology in Central-Western Patagonia (South America). *Journal of Archaeological Science*, 38, 2313-2323.
- Barberena, R., Durán, V. A., Novellino, P., Winocur, D., Benítez, A., Tessone, A., Quiroga, M. N., Marsh, E. J., Gasco, A., Cortegoso, V., Lucero, G., Llano, C. & Knudson, K. J. (2017). Scale of Human Mobility in The Southern Andes (Argentina and Chile): A New Framework Based on Strontium Isotopes. *American Journal of Physical Anthropology*, 164, 305-320.
- Barberena, R., Berón, M. & Luna, L. (2018). Isótopos estables en el Sitio Chenque I: paleodieta y procedencia geográfica. En M. Berón (Ed.), *El Sitio Chenque I. Un cementerio prehispánico en la Pampa Occidental. Estilo de vida e interacciones culturales de cazadores-recolectores del Cono Sur Americano* (pp. 367-395). Buenos Aires: Sociedad Argentina de Antropología.
- Barberena, R., Tessone, A., Cagnoni, M., Gasco, A., Durán, V., Winocur, D., Benítez, A., Lucero, G., Trillas, D., Zonana, I., Novellino, P., Fernández, M., Bavio, M. A., Zubillaga, E. & Gautier, E. A. (2019). Bioavailable Strontium in the Southern Andes (Argentina and Chile): A Tool for Tracking Human and Animal Movement. *Environmental Archaeology*, 26(3), 323-335. <https://doi.org/10.1080/14614103.2019.1689894>
- Barberena, R., Menéndez, L., le Roux, P.J., Marsh, E.J., Tessone, A., Novellino, P., Lucero, G., Luyt, J., Sealy, J., Cardillo, M., Gasco, A., Llano, C., Frigolé, C., Guevara, D., Da Peña, G., Winocur, D., Benítez, A., Cornejo, L., Falabella, F., Méndez, C., Nuevo-Delaunay, A., Sanhueza, L., Santana-Sagredo, F., Troncoso, A., Zárate, S., Durán, V.A. & Cortegoso, V. (2020). Multi-isotopic and Morphometric Evidence For the Migration of Farmers Leading up to the Inka Conquest of the Southern Andes. *Scientific Reports*, 10, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78013-x>
- Barrientos, G., Catella, L. & Oliva, F. (2015). Nuevos datos de isótopos estables del C y N para el Sudeste de la Región Pampeana. *Revista de Antropología del Museo de Entre Ríos*, 1(1), 96-98.
- Bas, M., Briz i Godino, I., Álvarez, M., Vales, D. G., Crespo, E. A. & Cardona, L. (2019). Back to the Future? Late Holocene Marine Food Web Structure in a Warm Climatic Phase as a Predictor of Trophodynamics in a Warmer South-Western Atlantic Ocean. *Global Change Biology*, 25(2), 404-419.
- Beehr, D. E. & Ambrose, S. H. (2007). Reconstructing Mississippian diet in the American Bottom with stable isotope ratios of pot sherd residues. En H. Barnard & J. W. Eerkens (Eds.), *Theory and practice of archaeological residue analysis* (pp.189-197). Oxford: BAR International Series 1650, Archaeopress.
- Berón, M. A., Luna, L. & Barberena R. (2013). Isótopos de oxígeno en restos humanos del sitio Chenque I: primeros resultados sobre procedencia

- geográfica de individuos. *En* A. F. Zangrando, R. Barberena, A. Gil, G. Neme, M. Giardina, L. Luna, C. Otaola, S. Paulides, L. Salgán & A. Tivoli (Eds.), *Tendencias teórico-metodológicas y casos de estudio en la arqueología de Patagonia* (pp. 27-38). Buenos Aires: MHNSR-SAA-INAPL.
- Bernal, V., González, P. N., Gordón, F., & Pérez S. I. (2016). Exploring Dietary Patterns in the Southernmost Limit of Prehispanic Agriculture in America by Using Bayesian Stable Isotope Mixing Models. *Current Anthropology*, 57(2), 230-239.
- Bocherens, H., Cotte, M., Bonini, R., Scian, D., Straccia, P., Soibelzon, L. & Prevosti F. J. (2016). Paleobiology of Sabretooth Cat Smilodon Populator in the Pampean Region (Buenos Aires Province, Argentina) Around the Last Glacial Maximum: Insights from Carbon and Nitrogen Stable Isotopes in Bone Collagen. *Palaeogeography, Palaeoclimatology & Palaeoecology*, 449, 463-474.
- Bocherens, H., Cotte, M., Bonini, R. A., Straccia, P., Scian, D., Soibelzon, L. & Prevosti, F. J. (2017). Isotopic Insight on Paleodiet of Extinct Pleistocene Megafaunal Xenarthrans from Argentina. *Gondwana Research*, 48, 7-14.
- Bocherens, H., Cotte, M., Bonini, R. A., Straccia, P., Scian, D., Soibelzon, L. & Prevosti, F. J. (2018). Reply to “Comment on “Isotopic insight on paleodiet of ...” by Bocherens et al. (Gondwana Research, 48(1), 7-14)”. *Gondwana Research*, 58, 243-245.
- Boecklen, W. J., Yarnes, C. T., Cook, B. A. & James, A. C. (2011). On The use of Stable Isotopes in Trophic Ecology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 411-440. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144726>
- Bond, A. L. & Diamond, A. W. (2011). Recent Bayesian Stable-isotope Mixing Models are Highly Sensitive to Variation in Discrimination Factors. *Ecological Applications*, 21, 1017-1023.
- Bond, A. L. & Hobson, K. A. (2012). Reporting Stable-Isotope Ratios in Ecology: Recommended Terminology, Guidelines and Best Practices. *Waterbirds*, 35(2), 324-331.
- Bonomo, M., Scabuzzo, C., Politis, G. & Zucol, A. (2017). Stable Carbon and Nitrogen Isotope Studies in the Paraná River Delta (Argentina): An Approach to Prehispanic Diets. *Latin American Antiquity*, 28(1), 105-126.
- Borrero, L. A., Guichón, R., Tykot, R., Kelly, J., Prieto, A. & Cárdenas, P. (2001). Dieta a partir de isótopos estables en restos óseos humanos de Patagonia austral. Estado actual y perspectivas. *Anales Instituto de la Patagonia*, 29, 119-127.
- Borrero L. A., Barberena, R., Franco, N.V., Charlin, J. & Tykot, R. (2009). Isotopes and Rocks: Geographical Organisation of Southern Patagonian Hunter-Gatherers. *International Journal of Osteoarchaeology*, 19, 309-327.
- Casey, M.M. & Post, D.M. (2011). The Problem of Isotopic Baseline: Reconstructing the Diet and Trophic Position of Fossil Animals. *Earth Science Reviews* 106, 131-148.
- Cassiodoro, G. E. & Tessone, A. (2014). Análisis radiocarbónico y de isótopos estables en residuos cerámicos del centro-oeste de Santa Cruz (Patagonia). *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología*, XXXIX, 293-299.
- Chaile, C., Lantos, I., Maier, M., Cassiodoro, G. & Tessone, A. (2018a). Análisis de residuos orgánicos en tecnología cerámica durante el Holoceno tardío en el centro-oeste de Santa Cruz, Argentina. *Intersecciones en Antropología*, 21(1), 5-16.
- Chaile, C., Tessone, A., Cassiodoro, G., Bellelli, C. & Belardi, J.B. (2018b). $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in Organic Residues of Patagonia Pottery. Implications for Studies of Diet and Subsistence Strategies Among Late Holocene Hunter-Gatherers. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 20, 47-56.

- Cirigliano, N. A., Montenegro, T., Franco, N. V., Brook, G. A. & Cherkinsky, A. (2019). Hallazgos cerámicos y su cronología en el área comprendida entre el extremo sur del macizo del deseado y la cuenca del Río Santa Cruz (Patagonia Sur, Argentina). *Magallania*, 47, 132-149.
- Czerwonogora, A., Fariña, R. A. & Tonni, E. P. (2011). Diet and Isotopes of Late Pleistocene Ground Sloths: First Results for *Lestodon* and *Glossotherium* (Xenarthra, Tardigrada). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 262, 257-266.
- Cohen, A. S. (2003). *Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems*. Oxford: Oxford University Press.
- Colonese, A., Verdún-Castelló, E., Álvarez, M., Godino, I., Zurro, D. & Salvatelli, L., (2012). Oxygen Isotopic Composition of Limpet Shells from the Beagle Channel: Implications for Seasonal Studies in Shell Middens of Tierra del Fuego. *Journal of Archaeological Science*, 39(6), 1738-1748.
- Dantas, M., Figueroa, G., Laguens, A. & Izeta, A. (2014). Isótopos estables, dieta de camélidos y diferenciación social (Valle De Ambato, Catamarca, Argentina, Siglos VI-XI D.C.). *Revista Chilena de Antropología*, 30, 90-97.
- Dantas, M. & Knudson, K. J. (2016). Isótopos de estroncio: cría, circulación y apropiación de camélidos en Aguada de Ambato (Catamarca, Argentina). *Intersecciones en Antropología*, 17(2), 239-250.
- Daux, V., Lécuyer, C., Héran, M. A., Amiot, R., Simon, L., Fourel, F., Martineau, F., Lynnerup, N., Reyhler, H. & Escarguel, G. (2008). Oxygen Isotope Fractionation Between Human Phosphate and Water Revisited. *Journal of Human Evolution*, 55, 1138-47.
- De Niro, M. J. (1985). Postmortem Preservation and Alteration of in Vivo Bone Collagen Isotope Ratios in Relation to Paleodietary Reconstruction. *Nature*, 317, 806-809.
- Ehleringer, J. R. & Rundel, P. W. (1989). Stable Isotopes: History, Units, and Instrumentation. En P. W. Rundel, J. R. Ehleringer, & K. A. Nagy (Eds.), *Stable Isotopes in Ecological Research* (pp. 1-15). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3498-2_1
- Ehleringer, J. R., Bowen, G. J., Chesson, L. A., West, A. G., Podlesak, D. W. & Cerling, T. E. (2008). Hydrogen and Oxygen Isotope Ratios in Human Hair are Related to Geography. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(8), 2788-2793.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H. & Urey, H. (1951). Carbonate-water Isotopic Temperature Scale. *Bulletin of the Geological Society of America*, 62, 417-26.
- Ericson, J. E. (1985). Strontium Isotope Characterization in the Study of Prehistoric Human Ecology. *Journal of Human Evolution*, 14, 503-514.
- Fariña, R. A. & Varela, L. (2018). Comment on "Isotopic insight on paleodiet of extinct Pleistocenemegafaunal Xenarthrans from Argentina" by H. Bocherens, M. Cotte, R. A. Bonini, P. Straccia, D. Scian, L. Soibelzon and F. J. Prevosti. *Gondwana Research*, 48, 7-14.
- Favier Dubois, C. M., Borella, F. & Tykot R. H. (2010). Explorando tendencias en el uso humano del espacio y los recursos en el litoral rionegrino (Argentina) durante el Holoceno medio y tardío. En M. Salemme, F. Santiago, M., Álvarez, E. Piana, M. Vázquez & E. Mansur (Eds.), *Arqueología de la Patagonia - Una mirada desde el último confín* (pp. 985-998). Ushuaia: Utopías.
- Fernandes, R. (2015). A Simple(R) Model to Predict the Source of Dietary Carbon in Individual Consumers. *Archaeometry*, 58, 500-512. <https://doi.org/10.1111/arc12193>

- Fernandes, R., Millard, A. R., Brabec, M., Nadeau, M. J. & Grootes, P. (2014). Food Reconstruction Using Isotopic Transferred Signals (FRUITS): A Bayesian Model For Diet Reconstruction. *PloS one*, 9(2), e87436. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087436>
- Fernandes, R., Grootes, P., Nadeau, M. J. & Nehlich, O. (2015). Quantitative Diet Reconstruction of a Neolithic Population Using a Bayesian Mixing Model (FRUITS): The Case Study of Ostorf (Germany). *American Journal of Physical Anthropology*, 158, 325-340.
- Fernández, J. & Panarello, H. O. (1988-1990). Paleodietas y patrones de movilidad de cazadores recolectores: su estimación en base a los isótopos estables del carbono. *Anales de Arqueología y Etnología*, 43-45, 599-611.
- Fernández, J. & Panarello, H. O. (1989-1990). Isótopos en Arqueología. 1. Valores isotópicos del oxígeno en aguas meteóricas y su pasaje a la sangre humana y a la de camélidos de la Puna jujeña, a 4.000 m de altitud. *Runa*, 19(1), 47-58.
- Fernández, J., Panarello, H. O. & Valencio, S. A. (1988-1990). Isótopos estables del oxígeno y paleotemperaturas. *Anales de Arqueología y Etnología*, 43-45, 103-114.
- Fernández, J., Markgraf, V., Panarello, H. O., Albero, M., Angiolini, F. E., Valencio, S. & Arriaga, M. (1991). Late Pleistocene/Early Holocene Environments and Climates, Fauna, and Human Occupation in the Argentine Altiplano. *Geoarchaeology*, 6(3), 251-272.
- Fernández, J., Panarello, H. O. & Ramos, A. (1992). El análisis de los elementos de traza y de las relaciones entre isótopos estables del carbono en cerámica del temprano (3000 años AP), como indicadores de su manufactura autóctona y funcionalidad probable. *Cuadernos*, 3, 13-19.
- Fernández, J. & Panarello, H. O. (1999-2001a). Los isótopos estables del carbono en pelo de animales silvestres de ambientes altiplánicos de Argentina. *Xama*, 12-14, 61-69.
- Fernandez, J. & Panarello H. O. (1999-2001b). Isótopos del carbono en la dieta de herbívoros y carnívoros de los andes jujeños. *Xama*, 12-14, 71-85.
- Fernández, J., Panarello, H. O. & Schobinger, J. (1999). The Inka Mummy from Mount Aconcagua: Decoding the Geographic Origin of the “Messenger to the Deities” by Means of Stable Carbon, Nitrogen, and Sulfur Isotope Analysis. *Geoarchaeology: An International Journal*, 14(1), 27-46.
- Fernández, P. M. & Tessone, A. (2014). Modos de ocupación del bosque patagónico de la vertiente oriental de los Andes: aportes desde la Ecología Isotópica. *Revista Chilena de Antropología*, 30, 83-89.
- Fey, M., Korr, C., Maidana, N. I., Carrevedo, M. L., Corbella, H., Dietrich, S., Haberzettl, T., Kuhn, G., Lücke, A., Mayr, C., Ohlendorf, C., Paez, M. M., Quintana, F.A., Schäbitz, F. & Zolitschka, B. (2009). Palaeoenvironmental Changes During the Last 1600 Years Inferred from the Sediment Record of a Cirque Lake in Southern Patagonia (Laguna Las Vizcachas, Argentina). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 363-375.
- Flensburg, G., Martínez, G. & Tessone, A. (2018). First Approach to the paleodiet of Hunter-Gatherers Through Stable Isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) in the Eastern Pampa-Patagonia Transition During the Middle Holocene. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 17, 571-580.
- Flensburg, G., Martínez, G. & Tessone, A. (2020). Paleodieta en grupos cazadores-recolectores de la transición pampeano-patagónica oriental (Argentina) durante los últimos 6.000 años. *Latin American Antiquity*, 31, 1-19. <https://doi.org/10.1017/laq.2019.72>

- Flores, C., Gayo, E. M., Salazar, D. & Broitman, B. R. (2018). $\delta^{18}\text{O}$ of *Fissurella Maxima* as a Proxy for Reconstructing Early Holocene Sea Surface Temperatures in the Coastal Atacama Desert (25°S). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 499, 22-34
- Fry, B. (2006). *Stable Isotope Ecology*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/0-387-33745-8>
- Giardina, M., Corbat, M., Otaola, C., Salgán, L., Ugan, A., Neme, G. & Gil, A. (2014). Recursos y dietas humanas en laguna Llancanelo (Mendoza, Nordpatagonia): una discusión isotópica del registro arqueológico. *Magallania*, 42, 111-131.
- Gil, A. F., Neme, G. A. & Tykot R. H. (2010). Isótopos estables y consumo de maíz en el Centro Occidente Argentino: Tendencias temporales y espaciales. *Chungará*, 42(2), 497-513.
- Gil, A. F., Villalba, R., Ugan, A., Cortegoso, V., Neme, G., Michieli, C. T., Novelino, P. & Durán, V. (2014a). Isotopic Evidence on Human Bone for Declining Maize Consumption During the little Ice Age in Central Western Argentina. *Journal of Archaeological Science*, 49, 213-227.
- Gil, A. F., Neme, G. A., Ugan, A. & Tykot, R. H. (2014b). Oxygen Isotopes and Human Residential Mobility in Central Western Argentina. *International Journal of Osteoarchaeology*, 24(1), 31-41.
- Gil, A., Menendez, L. P., Atencio, J. P., Peralta, E. A., Neme, G. A. & Ugan, A. (2017). Estrategias humanas, estabilidad y cambio en la frontera agrícola Sur Americana. *Latin American Antiquity*, 29, 6-26.
- Gil, A., Otaola, C., Neme, G., Peralta, E. A., Abbona, C., Quiroga, G., Dauverné, A. & Seitz, V. P., (2019). Lama Guanicoe Bone Collagen Stable Isotope (C and N) Indicate Climatic and Ecological Variation During Holocene in Northwest Patagonia. *Quaternary International*, 548, 27-40.
- Gómez Otero, J. (2007). Isótopos estables, dieta y uso del espacio en la costa atlántica centro-septentrional y el valle inferior del río Chubut (Patagonia argentina). En F. Morello, M. Martinic, A. Prieto & G. Bahamondes (Eds.), *Arqueología de Fuego-Patagonia. Levantando piedras, desenterrando huesos... y develando arcanos* (pp. 151-161). Punta Arenas: CEQUA.
- Gómez Otero, J. & Novelino, P. (2011). Diet, Nutritional Status and Oral Health in Hunter-Gatherers from the Central-Northern Coast of Patagonia and the Chubut River Lower Valley, Argentina. *International Journal of Osteoarchaeology*, 21, 643-659.
- Gómez Otero, J., Constenla, D. & Schuster, V. (2014). Análisis de isótopos estables de carbono y nitrógeno y cromatografía gaseosa en la cerámica arqueológica del nordeste de la provincia de Chubut (Patagonia argentina). *Arqueología*, 20, 263-284.
- González, M. I. & Frère, M. M. (2017). Análisis de isótopos estables en cerámica arqueológica del Río Salado bonaerense. *Comechingonia*, 21, 229-254.
- Gordillo, S., Brey, T., Beyer, K. & Lomovasky, B. J. (2015). Climatic and Environmental Changes During the Middle to Late Holocene in Southern South America: A Sclerochronological Approach Using the Bivalve *Retrotapes Exalbidus* (Dillwyn) from the Beagle Channel. *Quaternary International*, 377, 83-90.
- Gordillo, I. & Killian Galván, V. A. (2017). Análisis paleodietario de individuos humanos procedentes del sitio arqueológico La Rinconada (Valle de Ambato, Catamarca). *Arqueología*, 23(2), 125-135. <https://doi.org/10.34096/arqueologia.t23.n2.3781>
- Gordón, F., Perez, I. S., Hajduk, A., Lezcano, M. & Bernal, V. (2018). Dietary Patterns in Human Populations from Northwest Patagonia During Holocene: An Approach Using Binford's Frames

- of Reference and Bayesian Isotope Mixing Models. *Archaeological and Anthropological Science*, 10, 1347-1358.
- Grant, J., Mondini, M. & Panarello, H. O. (2018). Carbon and Nitrogen Isotopic Ecology of Holocene Camelids in the Southern Puna (Antofagasta de la Sierra, Catamarca, Argentina): Archaeological and Environmental Implications. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 18, 637-647.
- Grossman, E. & Ku, T. (1986). Oxygen and Carbon Isotope Fractionation in Biogenic Aragonite: Temperature Effects. *Chemical Geology*, 59, 59-74.
- Guichón, R., Borrero, I., Prieto, A., Cárdenas, P. & Tykot R. (2001). Nuevas determinaciones de isótopos estables para Tierra del Fuego. *Revista Argentina de Antropología Biológica*, 3(1), 113-126.
- Hart, J. P., Lovis, W. A., Schulenberg, J. K. & Urquhart, G. R. (2007). Paleodietary Implications from Stable Carbon Isotope Analysis of Experimental Cooking Residues. *Journal of Archaeological Science*, 34, 804-813.
- Hart, J. P., Urquhart, G. R., Feranec, R. S. & Lovis, W. A. (2009). Non-Linear Relationship Between Bulk $\delta^{13}\text{C}$ and Percent Maize in Carbonized Cooking Residues and the Potential of False-Negatives in Detecting Maize. *Journal of Archaeological Science*, 36, 2206-2212.
- Heaton, T. H. E. (1987). The $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios of Plants in South Africa and Namibia: Relationship to Climate and Coastal/Saline Environments. *Oecologia*, 74, 236-246.
- Horiuchi, A., Miyata, Y., Kamijo, N., Cramp, L.J.E. & Evershed, R.P. (2013). A Dietary Study of the Kamegaoka Culture Population During the Final Jomon Period, Japan, Using Stable Isotope and Lipid Analyses of Ceramic Residues. *Radiocarbon*, 57, 721-736.
- Hu, Y., Ambrose, S. H., & Wang, C. (2006). Stable Isotopic Analysis of Human Bones from Jiahu Site, Henan, China: Implications for the Transition to Agriculture. *Journal of Archaeological Science*, 33(9), 1319-1330. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.01.007>
- Izeta, A. D., Laguens, A.G., Marconetto, M. B. & Scattolin M. C. (2009). Camelid Handling in the Meridional Andes During the First Millennium AD: A Preliminary Approach Using Stable Isotopes. *International Journal of Osteoarchaeology*, 19, 204-14.
- Katzenberg, M. A. (1989). Stable Isotope Analysis of Archaeological Faunal Remains from Southern Ontario. *Journal of Archaeological Science*, 16(3), 319-329. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(89\)90008-3](https://doi.org/10.1016/0305-4403(89)90008-3)
- Katzenberg, M. A. (2006). Prehistoric Maize in Southern Ontario: Contributions from Stable Isotope Studies. En J. E. Staller, R. H. Tykot & B. F. Benz (Eds.), *Histories of Maize: Multidisciplinary Approaches to the Prehistory, Linguistics, Biogeography, Domestication, and Evolution of Maize* (pp. 263-270). New York: Academic Press.
- Keeling, R. F., Graven, H. D., Welp, L. R., Resplandy, L., Bi, J., Piper, S. C., Sun, Y., Bollenbacher, A. & Meijer, H. A. J. (2017). Atmospheric Evidence for a Global Secular Increase in Carbon Isotopic Discrimination of Land Photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(39), 10361-10366.
- Kelly, J. F. (2000). Stable Isotopes of Carbon and Nitrogen in the Study of Avian and Mammalian Trophic Ecology. *Canadian Journal of Zoology*, 78(1), 1-27. <https://doi.org/10.1139/z99-165>
- Killian Galván, V. A., Seldes, V., Mercolli, P. H., Nielsen, A. E., Olivera, D., Panarello, H. O., Otero, C., Rivolta, C. & Mamaní, H. (2014). Primera aproximación al estudio paleodietario en el sector medio de Quebrada de Humahuaca (Jujuy, Argentina) En V. Seldes y S. Gheggi

- (Eds.), *Antropología Biológica y estudios del comportamiento mortuario de los pueblos prehispánicos del Noroeste Argentino* (pp. 114-140). Buenos Aires: Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Killian Galván, V. A. (2015). Consumo de maíz (*Zea mays*) en el Noroeste argentino Prehispánico: un estudio paleodietario a través del análisis de isótopos estables. (Tesis de Doctorado inédita). Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Killian Galván, V. A. (2018). Models for Paleodietary Research: Three Case-Studies from Arid and Semi-Arid Environments in Northwest Argentina. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 18, 608-616.
- Killian Galván, V.A., Grant, J.L., Escola, P., Panarello, H.O. & Olivera, D.E. (2016a). Análisis de paleodietas humanas en zonas áridas a través de isótopos estables: el caso de Antofagasta de la Sierra (noroeste argentino). *Revista Colombiana de Antropología*, 52(2), 199-227.
- Killian Galván, V.A., Martínez, J., Cherkinsky, A., Mondini, M. & Panarello, H.O. (2016b). Stable Isotope Analysis on Human Remains from the Final Early Holocene in the Southern Puna of Argentina: The case of Peñas de las Trampas 1.1. *Environmental Archaeology*, 21(1), 1-10.
- Killian Galván, V. A., Tessone, A., Valenzuela, L. O., Sharp, Z. D. & Panarello, H.O. (2020). Stable Isotope Analysis of the Inca Mummy from Nevado de Chuscha (Salta, Argentina). *Archaeometry*, 62, 19-34.
- Koch, P.L., Behrensmeyer, A. K., Stott, A. W., Tuross, N., Evershed, R.P. & Fogel, M. L. (2001). The Effects of Weathering on the Stable Isotope Composition of Bones. *Ancient Biomolecules*, 3, 117-134.
- Kochi, S. (2017). Paleodietas en cazadores-recolectores del canal Beagle durante el Holoceno tardío. *Intersecciones en Antropología*, 18(3), 329-339.
- Kochi, S., Pérez, S. A., Tessone, A., Ugan, A., Tafuri, M. A., Nye, J., Tivoli, A. M. & Zangrando, A. F. (2018). $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ Variations in Terrestrial and Marine Foodwebs of Beagle Channel in the Holocene. Implications for Human Paleodietary Reconstructions. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 18, 696-707. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.11.036>
- Kochi, S., Tessone, A., Zangrando, F., Ugan, A., Alunni, D., Salemme, M., Santiago, F. & Vázquez, M. (2020). $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ Variation on Guanacos in Tierra del Fuego: References for Terrestrial Foodwebs in a High-Latitude Island. *Archaeological and Anthropological Sciences* 12, 52. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01011-7>
- Kohn, M. J. & Cerling, T. E. (2002). Stable Isotope Compositions of Biological Apatite. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1), 455-488. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.12>
- Krajcarz, M. T., Krajcarz, M., Drucker, D. G. & Bocherens, H. (2019). Prey-to-fox Isotopic Enrichment of 34S in Bone Collagen: Implications for Paleoecological Studies. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 33, 1311-1317.
- Laguens, A. G., Fabra, M., Santos, G. M. & Demarchi, D. A. (2009). Palaeodietary Inferences Based on Isotopic Data for Pre-Hispanic Populations of the Central Mountains of Argentina. *International Journal of Osteoarchaeology*, 19, 237-249.
- Lantos, I. (2014). Prácticas de preparación y consumo de maíz (*Zea mays*) de las poblaciones del oeste de Tinogasta (Catamarca, Argentina) a través del estudio de residuos en vasijas cerámicas (Siglos III - XVI d.C.). (Tesis de Doctorado inédita), Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

- Lantos, I., Spangenberg, J. E., Giovannetti, M. A., Ratto, N. & Maier, M. S. (2015). Maize Consumption in Pre-Hispanic South-Central Andes: Chemical and Microscopic Evidence from Organic Residues in Archaeological Pottery from Western Tinogasta (Catamarca, Argentina). *Journal of Archaeological Science*, 55, 83-99.
- Lee-Thorp, J. A. (2008). On Isotopes and Old Bones. *Archaeometry*, 50(6), 925-950. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00441.x>
- Leng, M. J. (2004). ISOTOPES in Quaternary PALaeoenvironmental Reconstruction (ISOPAL) *Quaternary Science Reviews*, 23(7-8), 739-741.
- Lewis, J., Pike, A. W. G., Coath, C. D. & Evershed, R. P. (2017). Strontium Concentration, Radiogenic ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and Stable ($\delta^{88}\text{Sr}$) Strontium Isotope Systematics in a Controlled Feeding Study. *STAR: Science & Technology of Archaeological Research*, 3(1), 45-57. <https://doi.org/10.1080/20548923.2017.1303124>
- Lightfoot, E. & O'Connell, T. C. (2016). On the Use of Biomineral Oxygen Isotope Data to Identify Human Migrants in the Archaeological Record: Intra-Sample Variation, Statistical Methods and Geographical Considerations. *PloS one*, 11(4), e0153850.
- Lillie, M. C. & Richards, M. (2000). Stable Isotope Analysis and Dental Evidence of Diet at the Mesolithic–Neolithic Transition in Ukraine. *Journal of Archaeological Science*, 27(10), 965-972. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0544>
- Longinelli, A. (1984). Oxygen Isotopes in Mammal Bone Phosphate: A New Tool for Paleohydrological and Paleoclimatological Research? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(2), 385-390. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90259-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90259-X)
- Loponte, D., Acosta, A. & Corriale, M. J. (2016). Isotopic Trends in the Diets of Hunter-Gatherers of the Lower Paraná Wetland, South America. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, 259-274.
- Loponte, D. & Corriale, M. J. (2020). Patterns of Resource Use and Isotopic Niche Overlap Among Guanaco (*Lama guanicoe*), Pampas Deer (*Ozotoceros bezoarticus*) and Marsh Deer (*Blastoceros dichotomus*) in the Pampas. Ecological, Paleoenvironmental and Archaeological Implications. *Environmental Archaeology*, 25(4), 411-444.
- Luz, B., Kolodny, Y. & Horowitz, M. (1984). Fractionation of Oxygen Isotopes Between Mammalian Bone-Phosphate and Environmental Drinking Water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(8), 1689-1693. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90338-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90338-7)
- Luz, B. & Kolodny, Y. (1985). Oxygen Isotope Variations in Phosphate of Biogenic Apatites, IV. Mammal Teeth and Bones. *Earth and Planetary Science Letters*, 75(1), 29-36. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90047-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90047-0)
- Malainey, M. E. (2011). *A Consumer's Guide to Archaeological Science: Analytical Techniques*. New York: Springer.
- Markgraf, V., Bradbury, J. P., Schwalb, A., Burns, S. J., Stern, C., Ariztegui, D., Gilli, A., Anselmetti, F. S., Stine, S. & Maidana N. (2003). Holocene Palaeoclimates of Southern Patagonia: Limnological and Environmental History of Lago Cardiel, Argentina. *Holocene*, 13, 581-591.
- Meyers, P.A., (2003). Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry*, 34, 261-289.
- Méndez, C., Barberena, R., Reyes, O. & Nuevo Delaunay, A. (2014) Isotopic Ecology and Human Diets in the Forest–Steppe Ecotone, Aisén Region, Central-Western Patagonia, Chile. *International Journal of Osteoarchaeology*, 24, 187-201. <https://doi.org/10.1002/oa.2337>

- Mengoni Goñalons, G. L. (2007). Camelid Management During Inca Times in N.W. Argentina: Models and Archaeozoological Indicators. *Anthropozoologica*, 42(2), 129-141.
- Mengoni Goñalons, G. L. (2015). Isótopos estables en camélidos del período tardío del noroeste de Argentina (NOA): estrategias de uso y manejo de rebaños. *Revista Chilena de Antropología*, 30, 68-75. <https://doi.org/10.5354/0719-1472.2015.36272>
- Miller, H., Chenery, C., Lamb, A. L., Sloane, S., Carden, R. F., Atici, L. & Sykes, N. (2019). The Relationship Between the Phosphate and Structural Carbonate Fractionation of Fallow Deer Bioapatite in Tooth Enamel. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 33, 151-164.
- Milner, N., Craig, O. E., Bailey, G. N., Pedersen, K., & Andersen, S. H. (2004). Something Fishy in the Neolithic? A Re-Evaluation of Stable Isotope Analysis of Mesolithic and Neolithic coastal populations. *Antiquity*, 78(299), 9-22.
- Montoya, J. P. (2007). Natural Abundance of ¹⁵N in Marine Planktonic Ecosystems. En R. Michener & K. Lajtha (Eds.), *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, (pp. 176-201). Malden, MA: Blackwell Publishing Ltd.
- Morales, M. R., Pirola, M. & Samec, C. T. (2015). Patrones en la composición isotópica del carbono de turbas holocénicas en la Puna argentina: implicaciones paleoambientales y paleoecológicas. *Estudios Sociales Del NOA*, 16, 69-86.
- Morales, M., Tessone, A. & Barberena, R. (2018). Archaeological Science in Southern South America: An Introduction. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 18, 606-607. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.01.039>
- Morton, J. D. & Schwarcz, H. P. (2004). Palaeodietary Implications from Stable Isotopic Analysis of Residues on Prehistoric Ontario Ceramics. *Journal of Archaeological Science*, 31, 503-517.
- Nehlich, O. (2015). The Application of Sulphur Isotope Analyses in Archaeological Research: A Review. *Earth-Science Reviews*, 142, 1-17.
- Neme, G., Barberena, R., Giardina, M. & Gil, A. F. (2006). Taller de arqueología e isótopos estables en el extremo sur de Sudamérica. *Intersecciones en Antropología*, 7, 405-406
- Newsome, S. D., Martinez del Rio, C., Bearhop, S. & Phillips, D. L. (2007). A Niche for Isotopic Ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(8), 429-436.
- Newsome, S. D., Clementz, M. R. & Koch, P. L. (2010). Using Stable Isotope Biochemistry to Study Marine Mammal Ecology. *Marine Mammal Science*, 26, 509-572.
- Newsome, S. D., Wheatley, P. V., Tinker, M. T. & Yeakel, J. D. (2012). Tools for Quantifying Isotopic Niche Space and Dietary Variation at the Individual and Population Level. *Journal of Mammalogy*, 93, 329-341.
- Nicastro, A., Surge, D., Briz i Godino, I., Álvarez, M., Schöne, B.R. & Bas, M., (2020). High-Resolution Records of Growth Temperature and Life History of Two Nacella Limpet Species, Tierra del Fuego, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 540, 109526.
- Nye, J.W., Zangrando, A. F., Martinoli, M. P. & Fogel, M. (2020). Temporal and Population Trends in Human Exploited Pinnipeds from Tierra del Fuego. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 554, 109804.
- Obelic, B., Álvarez, A., Argullós, J. & Piana, E. L. (1998). Determination of Water Paleotemperature in Beagle Channel (Argentina) During the Last 6000 yr Through Stable Isotope Composition of Mytilus Edulis Shells. *Quaternary of South America and Antartic Peninsula*, 11, 47-71.

- O'Connell, T. C. & Hedges, R. E. (1999). Isotopic Comparison of Hair and Bone: Archaeological Analyses. *Journal of Archaeological Science*, 26(6), 661-665.
- O'Connell, T. C., Hedges, R. E., Healey, M. A., & Simpson, A. H. R. W. (2001). Isotopic Comparison of Hair, Nail and Bone: Modern Analyses. *Journal of Archaeological Science*, 28(11), 1247-1255.
- Oliszewski, N., Killian Galván, V., Srur, G., Olivera, D. E. & Martínez, J. G. (2020). Human Paleodiet Studies Between ca. 3300–1500 Years BP in Quebrada de Los Corrales (Tucumán, Argentina). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 32, 102429.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102429>
- Olivera, D. E., Tchilinguirian, P. & Grana, L. (2004). Paleoambiente y arqueología en la Puna Meridional Argentina: archivos ambientales, escalas de análisis y registro arqueológico. *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología*, 29, 229-247
- Otaola, C., Santana-Sagredo, F., & Szpak, P. (2020). Stable isotopes in south American archaeology. *Quaternary International*, 548, 1-3.
- Ottalagano, F. & Loponte, D. (2017). Stable Isotopes and Diet in Complex Hunter-Gatherers of Paraná River Basin, South America. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 9, 865-877.
- Ottalagano, F. V. (2019). Valores de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y microrrestos vegetales presentes en residuos de alimentos adheridos en vasijas arqueológicas del sitio La Palmera 2 (noroeste de Entre Ríos, Argentina). *Comechingonia*, 23, 349-364.
- Panarello, H.O., Albero, M.C., & Angiolini, F. (1983). Stable Isotope Fractionation During the Benzene Synthesis for Radiocarbon Dating. *Radiocarbon*, 25(2), 529-537.
- Panarello, H.O. & Sanchez, E. (1985). The Kranz Syndrome in the Eragrostideae (Chloridoideae, Poaceae) as Indicated by Carbon Isotopic Ratios. *Bothalia*, 15, 587-590.
- Panarello, H. O. (1987). Oxygen-18 Temperatures on Present and Fossil Invertebrated Shells from Tunel Site (Beagle Channel, Argentine). *Quaternary of South America and Antartic Peninsula*, 5, 85-92.
- Panarello, H. O. (1989). *Relaciones entre concentraciones de isótopos livianos utilizadas para estudiar procesos ambientales y paleotemperaturas*. (Tesis de Doctorado inédita), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Panarello, H. O., Valencio, S. A., & Schobinger, J. (2003). Comparison of Carbon Isotope Variations on Hair of Two Inka Mummies from Chuscha and Aconcagua Mounts, Argentina. *En* A. N. Sial, F. Chemale, I. McReath, J. S. Bettencourt, M. M. Pimentel & M. J. B. Macambira (Eds.), *Short Papers, Fourth South American Symposium on Isotope Geology* (pp. 100-103). Salvador: Institut de Recherche pour le Developpment.
- Panarello, H. O., Zangrando, A. F., Tessone, A., Kozameh, L. F. & Testa, N. (2006). Análisis comparativo de paleodietas humanas entre la región del canal Beagle y Península Mitre: perspectivas desde los isótopos estables. *Magallania*, 34(2), 37-46.
- Panarello, H. O. & Dapeña, C. (2009). Large Scale Meteorological Phenomena, ENSO and ITCZ, Define the Paraná River Isotope Composition. *Journal of Hydrology*, 365, 105-112.
- Panarello, H., Tessone, A. & Zangrando, A. 2010. Isótopos estables en arqueología: principios teóricos, aspectos metodológicos y aplicaciones en Argentina. *Xama*; 19(23): 115-133.
- Panarello, H. O., Sancí, R. & Wassenaar, L. (2019). ^{14}C Chronology and Stable Isotopes on Lymnaea Viatrix Shells in Northwest Patagonia, Argentina.

- Do They Express the Antarctic Climatic Reversal? *Carbonates Evaporites*, 34, 133-142. Mixing Models. *Oecologia*, 130(1), 114-125. <https://doi.org/10.1007/s004420100786>
- Parnell A. C., Inger R., Bearhop S., Jackson A. L. (2010). Source Partitioning Using Stable Isotopes: Coping with Too Much Variation. *PLoS ONE* 5(3), e9672. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009672>
- Parnell, A. C., Phillips, D. L., Bearhop, S., Semmens, B. X., Ward, E. J., Moore, J. W., Jackson, A. L., Grey, J., Kelly, D. J. & Inger, R. (2013). Bayesian Stable Isotope Mixing Models. *Environmetrics*, 24(6), 387-399. <https://doi.org/10.1002/env.2221>
- Paunero, R., Valida, C., Rindel, D. & Tessone, A. (2017). La fauna pleistocénica: evidencias zooarqueológicas en la Meseta Central de Santa Cruz, los sitios de La María. *Magallania*, 45(2), 181-198.
- Pellegrini, M. & Snoeck, C. (2016). Comparing Bioapatite Carbonate Pre-Treatments for Isotopic Measurements: Part 2—Impact on Carbon and Oxygen Isotope Compositions. *Chemical Geology*, 420, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.10.038>
- Pellegrini, M., Pouncett, J., Jay, M., Pearson, M. P. & Richards, M. (2016). Tooth Enamel Oxygen “Isoscapes” Show a High Degree of Human Mobility in Prehistoric Britain. *Scientific Reports*, 6, 34986.
- Phillips, D. L. (2012). Converting Isotope Values to Diet Composition: The Use of Mixing Models. *Journal of Mammalogy*, 93(2), 342-352. <https://doi.org/10.1644/11-MAMM-S-158.1>
- Phillips, D. & Gregg, J. (2001). Uncertainty in Source Partitioning Using Stable Isotopes. *Oecologia*, 127, 171-179.
- Phillips, D. L. & Koch, P. L. (2002). Incorporating Concentration Dependence in Stable Isotope
- Phillips, D. L., Newsome, S. D. & Gregg, J. W. (2005). Combining Sources in Stable Isotope Mixing Models: Alternative Methods. *Oecologia*, 144(4), 520-527. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1816-8>
- Phillips, D. L., Inger, R., Bearhop, S., Jackson, A. L. Moore, J. W., Parnell, A.C., Semmens, B. X. & Ward, E. J. (2014). Best Practices for Use of Stable Isotope Mixing Models in Food-Web Studies. *Canadian Journal of Zoology*, 92, 823-835. <https://doi.org/10.1139/cjz-2014-0127>
- Piovano, E., Ariztegui, D., Bernasconi, S. M. & McKenzie, J. A. (2004). The Isotopic Record of Hydrological Changes in Subtropical South America Over the Last 230 Years. *The Holocene*, 14, 525-535.
- Pollard, A. M., Batt, C. M., Stern, B., Young, S. M. & Young, S. M. M. (2007). *Analytical Chemistry in Archaeology*. New York: Cambridge University Press.
- Post, D. M. (2002). Using Stable Isotopes to Estimate Trophic Position: Models, Methods, and Assumptions. *Ecology*, 83(3), 703-718.
- Praderio, A., Gil, A. & Forasiepi, A. (2012). El registro de Megatherium (Xenarthra, Tardigrada) en Mendoza (Argentina): aspectos taxonómicos, cronológicos y paleoecológicos. *Mastozoología Neotropical*, 19, 279-291.
- Prado, J. L., Alberdi, M. T., Azanza, B. & Sánchez, B. (2001). Climate and Changes in Mammal Diversity During the Late Pleistocene-Holocene in the Pampean Region (Argentina). *Acta Palaeontologica Polonica*, 46, 261-276.
- Prado, J. L., Sánchez, B. & Alberdi M. T. (2011). Ancient Feeding Ecology Inferred from Stable

- Isotopic Evidence from Fossil Horses in South America Over the Past 3 Ma. *BMC Ecology*, 11, 1-15.
- Prado, J. L. & Alberdi M. T. (2017). *Fossil Horses of South America. Phylogeny, Systemics and Ecology*. Springer, The Latin American Studies Book Series.
- Prendergast, A. L. & Stevens, R. E. (2014). Molluscs (Isotopes): Analyses in Environmental Archaeology. En C. Smith (Ed.), *Encyclopedia of Global Archaeology* (5010-50199). New York: Springer.
- Prevosti, F. J. & Martin, F. M. (2013). Paleoecology of the Mammalian Predator Guild of Southern Patagonia During the Latest Pleistocene: Ecomorphology, Stable Isotopes, and Taphonomy. *Quaternary International*, 305, 74-84.
- Prevosti, F. J. & Schubert, B. W. (2013). First Taxon Date and Stable Isotopes ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) from the Large Hypercarnivorous South American Canid *Procyon troglodytes* (*Canidae*, *Carnivora*). *Quaternary International*, 305, 67-73.
- Price, T. D., Burton, J. H. & Bentley, R. A. (2002). The Characterization of Biologically Available Strontium Isotope Ratios for the Study of Prehistoric Migration. *Archaeometry*, 44(1), 117-135. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00047>
- Rabanus-Wallace, T. M., Wooller, M. J., Zazula, G. D., Shute, E., Jahren, A. H., Kosintsev, P., Burns, J. A., Breen, J., Llamas, B. & Cooper, A. (2017). Megafaunal Isotopes Reveal Role of Increased Moisture on Rangeland During late Pleistocene Extinctions. *Nature Ecology & Evolution*, 1, 0125.
- Richards, M. P., Fuller, B. T., Sponheimer, M., Robinson, T. & Ayliffe, L. (2003). Sulphur Isotopes in Palaeodietary Studies: A Review and Results from a Controlled Feeding Experiment. *International Journal of Osteoarchaeology*, 13(1-2), 37-45.
- Samec, C. T. (2014). Ecología isotópica en la Puna Seca Argentina: un marco de referencia para el estudio de las estrategias de pastoreo en el pasado. *Cuadernos del Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano, Series Especiales*, 2(1), 61-85.
- Samec, C. T. (2015) Estudio de las relaciones entre los grupos humanos y las poblaciones de camélidos en la Puna Seca durante el Holoceno: una aproximación a partir de los isótopos estables. (Tesis de Doctorado inédita), Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- Samec, C. T., Yacobaccio, H. D., & Panarello, H. O. (2017). Carbon and nitrogen isotope composition of natural pastures in the dry Puna of Argentina: a baseline for the study of prehistoric herd management strategies. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 9(2), 153-163.
- Samec, C. T., Yacobaccio, H. & Panarello, H. O. (2018). Stable Isotope Compositions of South American Camelids in the Dry Puna of Argentina: A Frame of Reference for the Study of Prehistoric Herding and Hunting Strategies. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 18, 628-636.
- Samec, C. T., Pirola, M. & Killian Galván, V. A. (2019). Lineamientos para la publicación de resultados isotópicos en antropología biológica y arqueología. *Revista Argentina de Antropología Biológica*, 21(2), 007-007. <https://doi.org/10.24215/18536387e007>
- Samec, C. T., Pirola, M., Yacobaccio, H. & Panarello, H. O. (2020). Assessing Prehispanic Herding Strategies through Stable Isotope Analysis: A Case Study from the Dry Puna of Argentina. *Environmental Archaeology*, 25(3), 353-364.
- Sánchez, B., Prado, J. L. & Alberdi, M. T. (2006). Ancient Feeding Ecology and Extinction of Pleistocene Horses from Pampean Region (Argentina). *Ameghiniana*, 43, 427-436.

- Sandoval, B. (2019). Análisis de isótopos estables como herramienta para la construcción de perfiles biológicos: su potencialidad de uso en antropología forense. En A. Laguens, M. Bonnin & B. Marconetto (Eds.), *Libro de Resúmenes XX Congreso Nacional de Arqueología Argentina: 50 años de arqueologías* (pp., 672-675). Córdoba: Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba.
- Sayle, K. L., Cook, G. T., Ascough, P. L., Gestsdóttir, H., Hamilton, W. D. & McGovern, T. H. (2014). Utilization of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, and $\delta^{34}\text{S}$ Analyses to Understand ^{14}C Dating Anomalies Within a Late Viking Age Community in Northeast Iceland. *Radiocarbon*, 56(2), 811-821.
- Scabuzzo, C., Frontini, R., Vecchi, R. & Bayón, C. (2016). Isótopos estables y dieta de los cazadores recolectores del sudoeste bonaerense (Argentina). *Chungará*, 48(3), 383-395.
- Schitteck, K., Kock, S. T., Lücke, A., Hense, J., Ohlendorf, C., Kulemeyer, J. J., Lupo, L. C. & Schäbitz, F. (2016). A High-Altitude Peatland Record of Environmental Changes in the NW Argentine Andes (24 ° S) Over the Last 2100 Years. *Climate of the Past*, 12, 1165-1180.
- Schoeninger, M. J. (2009). Stable Isotope Evidence for the Adoption of Maize Agriculture. *Current Anthropology*, 50, 633-640.
- Sealy, J. C., van der Merwe, N. J., Sillen, A. K. & Krueger, H. W. (1991). $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ as a Dietary Indicator in Modern and Archaeological Bone. *Journal of Archaeological Science*, 18, 399-416.
- Sealy, J.C., Armstrong, R. & Schrire, C. (1995). Beyond Lifetime Averages: Tracing Life Histories Through Isotopic analysis of Different Calcified Tissues from Archaeological Human Skeletons. *Antiquity*, 69, 290-300.
- Sealy, J. C., Johnson, M., Richards, M. & Nehlich, O. (2014). Comparison of Two Methods of Extracting Bone Collagen for Stable Carbon and Nitrogen Isotope Analysis: Comparing Whole Bone Demineralization with Gelatinization and Ultrafiltration. *Journal of Archaeological Science*, 47, 64-69.
- Serna, A., Salazar-García, D. C., Valenzuela, L. O. & Prates, L. (2020a). A Tough Travesía: Mobility Constraints Among Late Holocene Patagonian Hunter-Gatherers Through Oxygen Stable Isotopes in Enamel and Water Sources. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 33, 102484.
- Serna, A., Prates, L., Mange, E., Salazar-García, D.C. & Bataille, C. P. (2020b). Implications for Paleomobility Studies of the Effects of Quaternary Volcanism on Bioavailable Strontium: A Test Case in North Patagonia (Argentina). *Journal of Archaeological Science*, 121, 105198.
- Sharp, Z. D., Atudorei, V., Panarello, H. O., Fernández, J. & Douthitt, C. (2003). Hydrogen Isotope Systematics of Hair: Archeological and Forensic Applications. *Journal of Archaeological Science*, 30(12), 1709-1716.
- Silva, L.C.R., Giorgis, M. A., Madhur, A., Enrico, L., Pérez-Harguindeguy, N., Falczuk, V., Tieszen, L. & Cabido, M. (2011). Evidence of Shift in C4 Species Range in Central Argentina During the Late Holocene. *Plant and Soil*, 349, 261-27.
- Skibo, J. M. (1992). *Pottery Function. A Use-Alteration Perspective*. New York: Plenum Press.
- Sponheimer, M. & Lee-Thorp, J.A. (1999). Isotopic Evidence for the Diet of An Early Hominid, *Australopithecus Africanus*. *Science*, 283, 368-370.
- Sponheimer, M., Robinson, T., Ayliffe, L., Passey, B., Roeder, B., Shipley, L., Lopez, E., Cerling, T., Dearing, D. & Ehleringer, J. (2003). An Experimental Study of Carbon-Isotope Fractionation Between Diet, Hair, and Feces of Mammalian Herbivores. *Canadian Journal of Zoology*, 81(5), 871-876.

- Steele, J. & Politis, G. (2009). AMS ^{14}C Dating of Early Human Occupation of Southern South America. *Journal of Archaeological Science*, 36(2), 419-429.
- Szpak, P., Metcalfe, J. Z. & Macdonald, R. A. (2017). Best Practices for Calibrating and Reporting Stable Isotope Measurements in Archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 13, 609-616. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.007>
- Tessone, A. (2010). Arqueología y Ecología Isotópica. Estudio de isótopos estables de restos humanos del Holoceno tardío en Patagonia meridional. (Tesis de Doctorado inédita), Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Tessone, A., Rindel, D., Belardi, J. B., Panarello, H. O., & Goñi, R. A. (2014a). $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ Variability in Modern Guanaco (Lama Guanicoe) Assemblages in Southern Patagonia: Implications for Zooarchaeological Studies. *International Journal of Osteoarchaeology*, 24(2), 202-218.
- Tessone, A., Fernández, P. M., Bellelli, C. & Panarello, H. O. (2014b). $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ Characterization of Modern Huemul (*Hippocamelus bisulcus*) from the Patagonian Andean Forest. Scope and Limitations of Their Use as a Geographical Marker. *International Journal of Osteoarchaeology*, 24, 219-230.
- Tessone, A., García Guraieb, S., Goñi, R. A. & Panarello, H. O. (2015). Isotopic Evidence of Weaning in Hunter-Gatherers from the Late Holocene in Lake Salitroso, Patagonia, Argentina. *American Journal of Physical Anthropology*, 158(1), 105-115. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22768>
- Tessone, A., Fernández, P. M., Fernández, N., & De Nigris, M. (2020a). Variaciones $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en huemul (*Hippocamelus bisulcus*) durante el Holoceno en Cerro Casa de Piedra, Santa Cruz, Argentina. Implicancias para el estudio de su distribución pasada. *Intersecciones en Antropología*, 21(1), 5-16.
- Tessone, A., Miotti, L., Marchionni, L., Hermo, D. & Mosquera B. (2020b). $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de fauna proveniente de sitios arqueológicos del Macizo del Deseado, Santa Cruz, Argentina. *Magallania*, 48 (1), 123-140. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-22442020000100123>
- Tieszen, L. L. (1991). Natural Variations in the Carbon Isotope Values of Plants: Implications for Archaeology, Ecology, and Paleoecology. *Journal of Archaeological Science*, 18(3), 227-248. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(91\)90063-U](https://doi.org/10.1016/0305-4403(91)90063-U)
- Tsutaya, T., Ishida, H., & Yoneda, M. (2015). Weaning Age in an Expanding Population: Stable Carbon and Nitrogen Isotope Analysis of Infant Feeding Practices in the Okhotsk Culture (5th–13th Centuries AD) in Northern Japan. *American Journal of Physical Anthropology*, 157(4), 544-555. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22740>
- Ugan, A., Neme, G., Gil, A., Coltrain, J., Tykot, R. & Novellino, P. (2012). Geographic Variation in Bone Carbonate and Water $\delta^{18}\text{O}$ Values in Mendoza, Argentina and Their Relationship to Prehistoric Economy and Settlement. *Journal of Archaeological Science*, 39, 2752-2763.
- Valenzuela, L. (2017). Spatial Distribution of Stable Isotopes as a Tool in Forensic Investigations. En C.M. Molina, L. Donnelly Chair, A. Baena, & F. Salvador F (Eds.), *3º Iberoamerican Seminar on Forensic Geosciences* (p. 25). La Plata: IUGS.
- Valenzuela, L. O., O'Grady, S. P., Enright, L. E., Murtaugh, M., Sweeney, C. & Ehleringer, J. R. (2018). Evaluation of Childhood Nutrition by Dietary Survey and Stable Isotope Analyses of Hair and Breath. *American Journal of Human Biology*, 30, e23103.
- Valero-Garcés, B., Delgado-Huertas, A., Ratto, N., Navas, A. & Edwards, L. (2000). Paleohydrology of Andean Saline Lakes from Sedimentological

- and Isotopic Records, Northwestern Argentina. *Journal of Paleolimnology*, 24, 343-359.
- van der Sluis, L. G., Reimer, P. J. & Ogle, N. (2019). Adding Hydrogen to the Isotopic Inventory—Combining $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^2\text{H}$ Stable Isotope Analysis for Palaeodietary Purposes on Archaeological Bone. *Archaeometry*, 61, 720-749.
- van Klinken, G. J. (1999). Bone Collagen Quality Indicators for Paleodietary and Radiocarbon Measurements. *Journal of Archaeological Science*, 26, 687-695.
- Weber, A. W., Link, D. W. & Katzenberg, M. A. (2002). Hunter-Gatherer Culture Change and Continuity in the Middle Holocene of the Cis-Baikal, Siberia. *Journal of Anthropological Archaeology*, 21, 230-299.
- Wilson, A. S., Taylor, T., Ceruti, M. C., Chavez, J. A., Reinhard, J., Grimes, V., Meier-Augenstein, W., Cartmell, L., Stern, B., Richards, M., Worobey, M., Barnes, I., Thomas, M. & Gilbert, P. (2007). Stable Isotope and DNA Evidence for Ritual Sequences in Inca Child Sacrifice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(42), 16456-16461.
- Wolf, N., Carleton, S. A. & Martínez del Rio, C. (2009). Ten Years of Experimental Animal Isotopic Ecology. *Functional Ecology*, 23(1), 17-26. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01529.x>
- Wright, L. E., & Schwarcz, H. P. (1996). Infrared and Isotopic Evidence for Diagenesis of Bone Apatite at Dos Pilas, Guatemala: Palaeodietary Implications. *Journal of Archaeological Science*, 23(6), 933-944, <https://doi.org/10.1006/jasc.1996.0087>
- Yacobaccio, H. D., Morales, M. R., & Samec, C. T. (2009). Towards an isotopic ecology of herbivory in the Puna ecosystem: New results and patterns in Lama glama. *International Journal of Osteoarchaeology*, 19, 144-155.
- Yacobaccio, H. D., Samec, C. T., & Catá, M. P. (2010). Isótopos estables y zooarqueología de camélidos en contextos pastoriles de la puna (Jujuy, Argentina). En M. A. Gutiérrez, M. De Nigris, P. M. Fernández, M. Giardona, A. Gil, A. Izeta, G. Neme, H. Yacobaccio (Eds.), *Zooarqueología a principios del siglo XXI. Aportes teóricos, metodológicos y casos de estudio* (pp. 77-86). Buenos Aires: Editorial del Espinillo.
- Yesner, D. R., Figuerero Torres, M. J., Guichón, R. & Borrero, L. A. (1991). Análisis de isótopos estables en esqueletos humanos: confirmación de patrones de subsistencia etnográficos para Tierra del Fuego. *Shincal*, 3, 182-191.
- Zangrando, A. F., Tessone, A., Ugan, A. & Gutiérrez, M. A. (2014). Applications of Stable Isotope Analysis in Zooarchaeology: An Introduction. *International Journal of Osteoarchaeology*, 24(2), 127-133. <https://doi.org/10.1002/oa.2378>
- Zangrando, A. F., Riccialdelli, L., Kochi, S., Nye, J. W. & Tessone, A. (2016). Stable Isotope Evidence Supports Pelagic Fishing by Hunter-Gatherers in Southern South America during the Late Holocene. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 8, 486-491.
- Zilio, L., Tessone, A. & Hammond, H. (2018). Stable Isotope Ecology and Human Palaeodiet in the Northern Coast of Santa Cruz (Argentine Patagonia). *International Journal of Osteoarchaeology*, 28(3), 305-317.