

Capítulo 5

Isótopos estables

Verónica Silva-Pinto, Eugenia M. Gayo & Domingo C. Salazar-García

1. Introducción

Desde su primera aplicación en Arqueología en la década de 1970, los análisis de isótopos estables se han vuelto una herramienta crucial en la investigación arqueológica, siendo uno de los métodos de más rápido desarrollo en los últimos 30 años. Esto, gracias a su gran versatilidad, a los avances y refinamientos en la metodología y, en especial, a la reducción significativa de los costos de análisis, de la cantidad de material requerido, del grado de invasión en el muestreo del material y de los tiempos de retorno de resultados. Sin duda todos estos factores han contribuido a que actualmente las caracterizaciones isotópicas de los registros arqueológicos sean una aproximación rutinaria para abordar e inferir diferentes aspectos sobre modos de vida, estrategias de subsistencia y prácticas culturales de las sociedades prehistóricas (Lee-Thorp, 2008; Makarewicz & Sealy, 2015; Salazar-García, 2015).

En este capítulo presentamos una aproximación introductoria al uso de los isótopos estables como una herramienta complementaria e independiente para los estudios arqueológicos y bioantropológicos. En este sentido, pretendemos estimular a estudiantes e investigadores en la búsqueda de nuevas aplicaciones de esta técnica en diversos campos y problemáticas de las disciplinas.

2. Principios de los isótopos estables

Los isótopos corresponden a átomos de un mismo elemento químico que tienen igual número de protones (número atómico, Z) pero que difieren en la cantidad de neutrones (N) en su núcleo. Dado que el ordenamiento en la tabla periódica se basa en el número atómico, entonces todas las variantes de un determinado elemento ocupan una misma ubicación en esta tabla. En nomenclatura química, estas variantes se distinguen entre sí por su número de masa ($A = \text{número protones} + \text{número neutrones}$), el cual se indica como un superíndice en la izquierda superior del símbolo correspondiente al elemento. Por ejemplo, los isótopos naturales de Carbono ($Z=6$) se designan como ^{12}C , ^{13}C y ^{14}C (fig. 1).

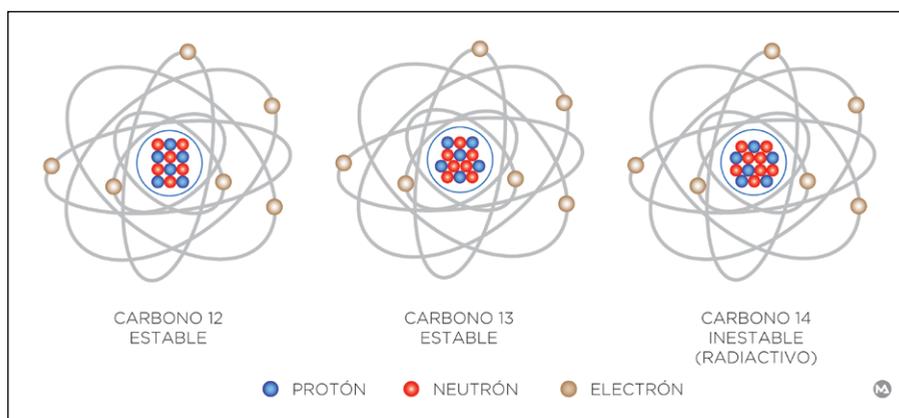


Figura 1 – Isótopos del carbono: ^{12}C (6 protones y 6 neutrones), ^{13}C (6 protones y 7 neutrones) y ^{14}C (6 protones y 8 neutrones)

Elaboración: D. C. Salazar García y M. Alarcón

Prácticamente todos los elementos químicos conocidos presentan al menos un isótopo, ya sea estable o inestable. Estos últimos experimentan transformaciones dependientes del paso del tiempo para alcanzar configuraciones nucleares más estables. En este proceso de cambio —llamado desintegración radiactiva— los átomos pierden partículas, emitiendo radiación. Uno de los radioisótopos más conocidos en Arqueología es el Carbono-14 (^{14}C), ampliamente utilizado para datar restos orgánicos de los últimos 50 000 años. Sin embargo, en este capítulo nos centramos en sistemas isotópicos ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) que no se descomponen con el paso del tiempo, por lo que sus proporciones reflejan los procesos y entornos inorgánico-biogénicos

en los que participan. En estudios arqueológicos que emplean también isótopos de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) se asume un comportamiento estable para el isótopo ^{87}Sr , aun cuando se origina por decaimiento radioactivo, ya que este proceso ocurre a escalas temporales (millones de años) imperceptibles para los procesos abordados por la Arqueología (Bentley, 2006). En la naturaleza, los isótopos con menor número de neutrones (llamados isótopos ligeros) son significativamente más abundantes que los de mayor número de neutrones (isótopos pesados). Dada la imposibilidad de determinar la abundancia absoluta de los sistemas isotópicos (e.g. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) se miden como una proporción entre el isótopo pesado y el ligero en un instrumento llamado Espectrómetro de Masa de Ratio Isotópica (IRMS). Usualmente, esta ratio isotópica (R) corresponde a un valor decimal muy pequeño. Por lo tanto, los laboratorios especializados proporcionan un valor de desviación isotópica (δ), el cual expresa la diferencia amplificada (en partes por mil) entre los ratios isotópicos de la muestra con respecto a un estándar internacional (cuadro 1). Valores positivos de la δ indican que la muestra está comparativamente más enriquecida en isótopos pesados que el estándar, mientras que valores negativos muestran que la muestra está empobrecida con relación al estándar.

Cuadro 1 – Abundancias naturales y estándar para los principales isótopos estables utilizados en Arqueología

Elemento	Isótopo	Abundancia	Estándar
Carbono	^{12}C	98,89	Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)
	^{13}C	1,11	
Nitrógeno	^{14}N	99,64	Air Nitrogen N_2 [atm.] (AIR)
	^{15}N	0,36	
Azufre	^{32}S	95,02	Canyon Diablo Triolite (CDT)
	^{34}S	4,21	
Oxígeno	^{16}O	99,76	Vienna-Standard Mean Ocean Water (VSMOW)
	^{18}O	0,204	
Hidrógeno	^1H	99,984	Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)
	^2H	0,016	
Estroncio	^{86}Sr	9,87	NIST Standard Reference Material 987 (SMR 987)
	^{87}Sr	7,04	

En la medida que comparten igual configuración electrónica, los isótopos estables de un determinado elemento presentan las mismas propiedades químicas. No obstante, las diferencias en la masa nuclear —dadas por el número de neutrones— determinan variaciones en sus propiedades físicas relacionadas con la velocidad de reacción y con cómo se establecen los enlaces entre átomos. En general, los isótopos pesados en las reacciones químicas y físicas tienen menor velocidad de reacción, establecen enlaces fuertes y tienden a concentrarse en el estado de la materia en el cual estos enlaces son más fuertes (sólido > líquido > gaseoso). Esto implica que en las reacciones ocurrirán cambios en la proporción de isótopos estables entre una sustancia sustrato y sus productos. Este proceso se denomina fraccionamiento isotópico (Schoeller, 1999). De acuerdo con Fry (2006), este proceso es el motor detrás de las variaciones isotópicas en el planeta, si este no existiera la distribución de isótopos en la naturaleza sería «aburrida» y uniforme.

3. El uso de los isótopos estables en Arqueología

Tradicionalmente, al no disponer de posibilidades analíticas directas, la investigación arqueológica ha utilizado métodos de análisis indirectos en el registro arqueológico para la reconstrucción de la subsistencia y la movilidad territorial. Estos métodos se basan en el estudio físico de los restos humanos, de fauna, fragmentos de plantas, artefactos, elementos foráneos y otro tipo de pruebas culturales halladas en los yacimientos arqueológicos, quedando restringida la información potencial a las condiciones de preservación variables de los distintos tipos de materiales (Salazar-García, 2015). Un ejemplo clave lo constituyen los recursos vegetales, ya que su menor frecuencia en relación con los restos de animales o su ausencia en el registro arqueológico no significa un menor consumo o que no fuesen consumidos (e.g. Power *et al.*, 2014; Power *et al.*, 2015; Salazar-García *et al.*, 2013).

En este contexto, los análisis de isótopos estables abren una posibilidad única para estudiar de forma directa cada uno de los recursos utilizados en el pasado, además de poder caracterizar las sociedades tanto desde escalas individuales como poblacionales. Si estos análisis se complementan con dataciones absolutas, adquirimos además resolución y contexto temporal para interpretar los resultados (e.g. Richards, Price *et al.*, 2003). De todas formas no debemos caer en el error de pensar que los análisis de isótopos estables u otros análisis bioquímicos puedan dar respuesta por sí mismos

a las problemáticas arqueológicas. Idealmente se debe trabajar conjugando el análisis contextual de los sitios arqueológicos, considerando las variables ambientales, y el análisis bioantropológico de los individuos.

Los análisis de isótopos estables pueden ser realizados en una gran variedad de materiales como suelos, metales, aguas, plantas, tejidos humanos y de fauna (básicamente, cualquier material que contenga átomos del isótopo que se quiere analizar). Sin embargo, el límite radica muchas veces en conocer apropiadamente el contexto químico y las rutas metabólicas que los átomos siguen, porque sin saber esto los resultados no se podrían contextualizar apropiadamente hasta que se conozcan. En Arqueología se realizan principalmente sobre restos esqueléticos (huesos y dientes) debido a la mayor preservación de estos materiales y al conocimiento de la procedencia de sus átomos, aplicándose de forma mayoritaria las relaciones entre cuatro elementos químicos principales (carbono $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, nitrógeno $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, oxígeno $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y estroncio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) así como, en menor medida, otros elementos cuya aplicación está aún en fases experimentales (azufre $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, hidrógeno $^2\text{H}/^1\text{H}$ y zinc $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$). Elementos que, a excepción del estroncio y el zinc, constituyen el quinteto de la vida y están presentes en todo organismo viviente y en todas las relaciones y reacciones bioquímicas de los procesos biológicos. No nos referiremos al zinc en profundidad en este capítulo, pues su aplicación está aún en fases de desarrollo muy preliminares.

La composición de la matriz orgánica del hueso (ca. 33%) está conformada por más de un 90% de colágeno y la inorgánica (ca. 66%) está conformada principalmente por hidroxiapatita. A su vez, los dientes están formados por el esmalte (casi en su totalidad inorgánico y de hidroxiapatita) y la dentina (con alrededor de un 20% de colágeno). El colágeno óseo y la dentina son los sustratos preferidos para los análisis de isótopos estables del carbono, nitrógeno y azufre, ya que proporcionan indicadores de calidad comprobados de su integridad isotópica (ratios C:N, %C, %N, %S, rendimiento de colágeno) que sirven para discriminar entre el colágeno bien preservado y el mal preservado (De Niro & Weiner, 1988; Nehlich & Richards, 2009; Van Klinken, 1999). Siendo el colágeno para algunos autores la única fuente de nitrógeno factible de considerar a partir de restos esqueléticos, debido a la diagénesis, entendida como los procesos posdeposicionales que modifican, en especial, las propiedades químicas estructurales del componente inorgánico de los huesos (De Niro, 1985; Van Klinken, 1999).

Algunas características del colágeno deben ser consideradas cuando se procede a la interpretación de los datos para la reconstrucción de la dieta. Si bien el hueso se renueva constantemente, el metabolismo del colágeno es bastante bajo y disminuye significativamente después del período de crecimiento. Por lo tanto, los valores de isótopos estables en el colágeno reflejan una dieta promedio entre 5 y 20 años de vida de un individuo antes de su muerte, dependiendo del tipo de hueso analizado (Hedges *et al.*, 2007). Además, las proporciones de isótopos estables del colágeno reflejan solo las señales isotópicas de las principales fuentes de proteínas consumidas, en especial para el nitrógeno, y por tanto no muestran los componentes de la dieta total (Ambrose & Norr, 1993). Dependiendo de los niveles de proteína en la dieta, el carbono puede derivar de otros macronutrientes dietéticos como azúcares y grasas (Howland *et al.*, 2003; Jim *et al.*, 2006).

El esmalte dental en los dientes permanentes se forma a través de un proceso de mineralización directa desde la infancia temprana (6 ± 3 meses) hasta la niñez (12 ± 2 años) y, al igual que la dentina, no se regenera. Por lo tanto, sus proporciones isotópicas, y por ende los resultados obtenidos, corresponden al período de la vida durante el cual se formaron, lo cual varía según la pieza dental utilizada. Por ejemplo, el primer molar permanente comienza su formación entre los 3 y 9 meses de edad y completa el desarrollo de la corona alrededor de los 4 años. El segundo molar en cambio se desarrolla cerca de los 3 años y completa el desarrollo de la corona cerca de los 8 años (Ubelaker, 1979). Al formarse por mineralización, el esmalte presenta una menor fracción orgánica siendo menos susceptible a la degradación e intercambio isotópico posdeposicional con el entorno de enterramiento. Sobre el esmalte dental pueden aplicarse análisis de isótopos estables de carbono, estroncio y oxígeno, lo que ha permitido determinar dieta, lugar de origen, pautas de movilidad durante la infancia y los patrones de amamantamiento-destete. Además, se están aplicando con éxito, aunque aún en etapa experimental, análisis de zinc $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ ($\delta^{66}\text{Zn}$) que dan información sobre el puesto del individuo analizado en la escala trófica de la cadena alimentaria (Jaouen *et al.*, 2016).

Cuando la conservación del material lo permite los análisis de isótopos estables pueden ser realizados en muestras de otros tejidos humanos, como por ejemplo el músculo o la queratina de pelo y uñas. Debido a su alto contenido en queratina (65-95% en peso), el análisis sobre pelo y uñas requiere una baja cantidad de material e involucra una técnica de muestreo simple y no invasiva que prescinde de complejos procedimientos de pretratamiento/

extracción en el laboratorio. Otras ventajas para estudios arqueológicos y forenses incluyen su alta resistencia a la degradación (Macko *et al.*, 1999) y su capacidad de registrar variaciones en el corto plazo (semanas, meses y años). Esto ha permitido estudios secuenciales de sucesivos fragmentos de pelos y/o uñas (e.g. Bowen *et al.*, 2009; Sharp *et al.*, 2003). En el cabello humano, cada centímetro desde la raíz corresponde aproximadamente a un mes antes de la muerte. En la queratina se realizan rutinariamente análisis de carbono y nitrógeno, y ha sido utilizado con éxito para análisis de azufre, oxígeno e hidrógeno. Esto permite estudiar cambios estacionales en la dieta, movilidad territorial y patrones de migración y/o ocupación, así como episodios de estrés nutricional, a corto plazo (e.g. Fuller *et al.*, 2005).

Es necesario destacar que las inferencias que involucran comparaciones de resultados deben ser realizadas utilizando un mismo tipo de material, ya que existen diferencias en los valores de un mismo individuo dependiendo del tipo de muestra utilizada. Por ejemplo, el colágeno de hueso presenta valores más enriquecidos con respecto a la queratina del cabello de un mismo individuo de aproximadamente +1,4‰ en $\delta^{13}\text{C}$ y +0,9‰ en $\delta^{15}\text{N}$ (O'Connell & Hedges, 1999; O'Connell *et al.*, 2001). Asimismo, se debe evitar el análisis de isótopos estables en materiales cuya composición isotópica no esté clara como por ejemplo los cálculos dentales (Salazar-García, Richard *et al.*, 2014), ya que puede generar graves errores en la interpretación de los resultados (e.g. Poulson *et al.*, 2013).

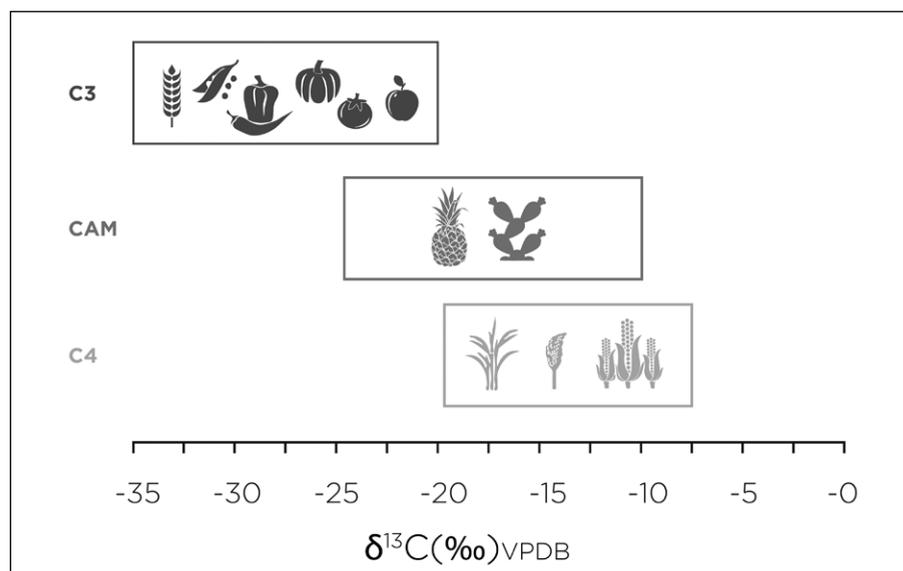
Con todas estas consideraciones es necesario definir a qué preguntas queremos dar respuesta a la hora de determinar qué materiales queremos muestrear y qué tipo de análisis debemos realizar.

3. 1. Isótopos de carbono y nitrógeno

Los isótopos estables más utilizados para la reconstrucción de las dietas humanas y animales del pasado son el carbono ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) y el nitrógeno ($^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$). Su aplicación se basa en el principio de que la composición isotópica de los alimentos consumidos por los animales y los seres humanos está registrada en sus tejidos corporales con un fraccionamiento isotópico predecible (Ambrose, 1993; Schoeller, 1999).

El carbono en forma de CO_2 atmosférico entra en la biósfera para posteriormente ser fijado mediante fotosíntesis por las plantas. Existen tres vías fotosintéticas:

el ciclo de Calvin (C_3), la vía de Hatch-Slack (C_4) y el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) (O'Leary, 1981; Smith & Epstein, 1971). Cada una de estas vías metaboliza el CO_2 atmosférico de formas radicalmente diferentes, produciendo por tanto diferentes fraccionamientos en los isótopos de carbono (Leatherdale, 2013). Las plantas C_3 y C_4 son ^{13}C empobrecidas en relación con su fuente de carbono inorgánico (CO_2 atmosférico); sin embargo, las plantas C_3 son mucho más empobrecidas que las plantas C_4 , con valores medios de $-27,1 \pm 2,0\%$ y $-13,1 \pm 1,2\%$, respectivamente. Por lo tanto, la composición isotópica del carbono refleja principalmente los tipos de plantas y los parámetros ecológicos que forman la base de la cadena alimentaria (Bocherens *et al.*, 2000; O'Leary, 1988) (fig. 2). En concreto, los isótopos estables de carbono ($\delta^{13}C$) permiten distinguir el consumo de una dieta terrestre (más empobrecido en ^{13}C) y alimentos marinos (más enriquecidos en ^{13}C) (Chisholm *et al.*, 1982). No obstante, hay que tener presente que los recursos de entornos marinos atípicos como los estuarinos, pueden presentar valores menores de $\delta^{13}C$ que los esperados (Salazar-García, Aura *et al.*, 2014). En cualquier caso, los ratios de isótopos estables del carbono también permiten diferenciar entre una dieta basada en plantas C_3 o animales que las consuman (más empobrecidos en ^{13}C) y otra basada en plantas C_4 o animales que las consuman (más enriquecidos en ^{13}C) (Van der Merwe & Vogel, 1978).



8 | **Figura 2 – Rangos $\delta^{13}C$ de plantas con distintas rutas fotosintéticas (C_3 , CAM, C_4)**

Elaboración: D. C. Salazar-García y M. Alarcón

Un ejemplo destacado de plantas C_4 lo constituye el maíz. Su incorporación a la dieta humana y animal es una clave inequívoca de la introducción de la agricultura, ya que es una de las pocas plantas C_4 de importancia en el consumo humano en la América prehispánica (Van der Merwe & Vogel, 1978; Tykot, 2006). El estudio de las señales isotópicas del maíz ha permitido a las(os) arqueólogas(os) realizar un seguimiento de la propagación e intensificación de la agricultura en todo el continente americano (e.g. Gil, 2003; Gil *et al.*, 2009; Katzenberg *et al.*, 1995; Schwarcz *et al.*, 1985).

Los isótopos de carbono permiten además discriminar entre dietas marinas y terrestres. En los organismos marinos la principal fuente de carbono es el CO_2 disuelto ($\delta^{13}C$ de 0‰ superior al $\delta^{13}C$ atmosférico), por lo que los vertebrados marinos poseen valores de $\delta^{13}C$ más enriquecidos ($\delta^{13}C_{medio} = -12 \pm 1‰$) que aquellos que presentan una dieta típicamente terrestre ($\delta^{13}C_{medio} = -20 \pm 1‰$) (De Niro & Epstein, 1978).

Por otra parte, la proporción isotópica de nitrógeno ($\delta^{15}N$) en los tejidos de plantas y animales permite evaluar el nivel trófico en la cadena alimentaria en el que los individuos analizados se encuentran, los tipos de plantas consumidas, los comportamientos de amamantamiento y destete, e incluso poder detectar episodios de estrés nutricional. Tradicionalmente se ha considerado que el valor de $\delta^{15}N$ aumenta con cada nivel trófico en torno a un 3-5‰ debido al fraccionamiento isotópico durante el metabolismo y la síntesis de tejidos; es decir, el consumidor tiene valores más altos que la proteína consumida (De Niro & Epstein, 1981; Schoeninger & De Niro, 1984). No obstante, algunos estudios más recientes sugieren que ese incremento pudiese ser mayor (O'Connell *et al.*, 2012). Esto permite que los isótopos estables de nitrógeno sean útiles para detectar la presencia de dietas con un alto nivel trófico como la marina y el consumo de pescados de agua dulce (Schoeninger *et al.*, 1983). También ayuda a distinguir las dietas ricas en proteína animal de las dietas basadas en recursos vegetales, entendiendo que los valores de $\delta^{15}N$ más alto se relacionan con un mayor consumo de alimentos de origen animal, mientras que los valores más bajos significan mayor consumo de vegetales (Minagawa & Wada, 1984) (fig. 3). De todas formas el consumo de carne animal, al tener más densidad proteica que los vegetales, puede enmascarar el consumo de recursos vegetales (Fiorenza *et al.*, 2015).

Teóricamente, las plantas tendrían los valores de $\delta^{15}N$ más bajos, seguidas de los herbívoros y omnívoros hasta llegar a los carnívoros, que tienen los

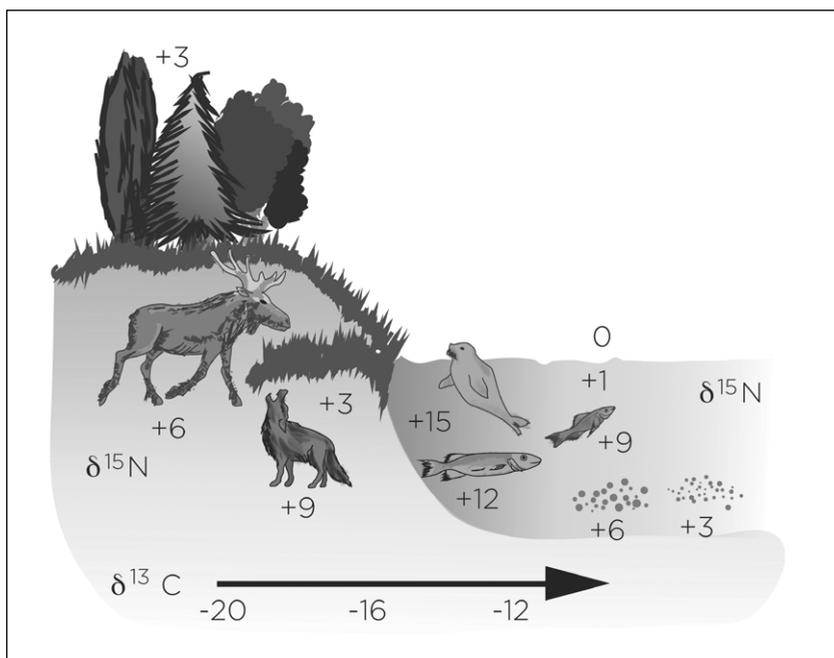


Figura 3 – Cambio en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) entre ecosistemas terrestres y marinos, y de valores de $\delta^{15}\text{N}$ (‰) entre niveles tróficos (Modificado de Salazar-García, 2015)

Elaboración: D. C. Salazar-García y M. Alarcón

valores más altos. Teniendo esto en cuenta, es relevante destacar que los organismos de ecosistemas marinos y lacustres son los que generalmente presentan mayores valores de $\delta^{15}\text{N}$ en comparación con los organismos de ecosistemas terrestres (De Niro & Epstein, 1981), en parte porque las cadenas alimentarias tienen más peldaños y, en consecuencia, se produce un mayor número de incrementos de $\delta^{15}\text{N}$ en el ecosistema (Minagawa & Wada, 1984) (fig. 4).

El efecto de nivel trófico también se aplica a los niños que consumen leche materna como fuente primaria de alimento, porque el lactante está en cierta medida consumiendo los tejidos de su madre en la forma de leche materna (Jenkins *et al.*, 2001; Metcalf *et al.*, 2010). En el nacimiento, los valores de $\delta^{15}\text{N}$ son equiparables a los de la madre, ya que reciben a través de la placenta los nutrientes de los alimentos que la madre consume, pero con el amamantamiento se incrementan hasta un 3-5‰. Más adelante, con el comienzo del destete descienden hasta ocupar el mismo nivel trófico que el resto de la población adulta, por lo que los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de los niños varían

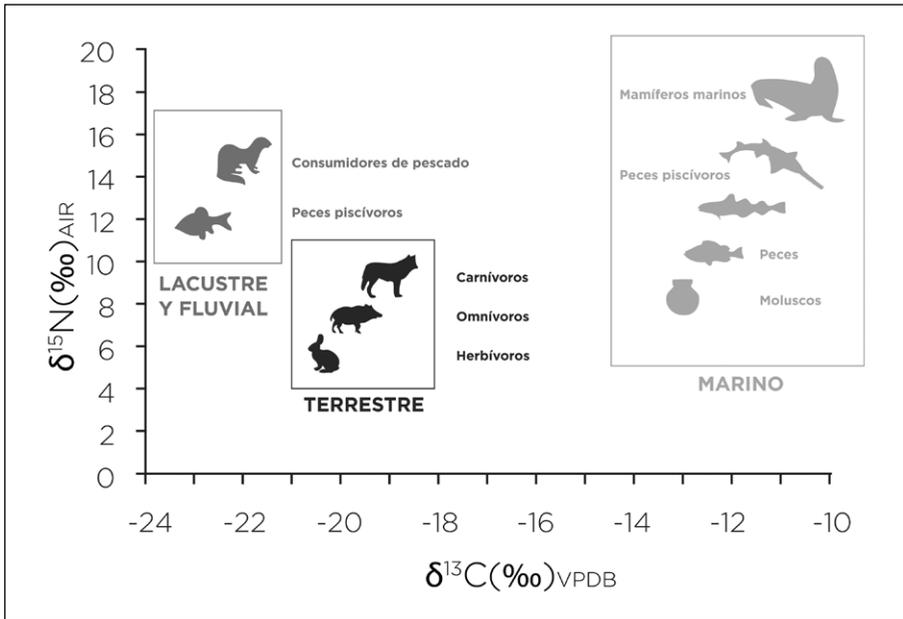


Figura 4 – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de animales de ecosistemas típicos (lacustre-fluvial, terrestre y marino)

Elaboración: D. C. Salazar-García y M. Alarcón

con la edad (Fuller *et al.*, 2006). Algo diferente ocurre con los valores de $\delta^{13}\text{C}$ del infante, estos podrían indicar el origen de las proteínas suplementarias que empiezan a introducirse con el destete (Salazar-García *et al.*, 2010).

Por otra parte, se ha comprobado que los valores de $\delta^{15}\text{N}$ en humanos son influenciados por el estrés nutricional. La privación de alimentos pone al individuo en un estado de catabolismo proteico a partir de los propios tejidos, produciendo un enriquecimiento de $\delta^{15}\text{N}$. Esto evidencia que los valores humanos de $\delta^{15}\text{N}$ aumentan como resultado del estrés nutricional, algo que debería ser considerado a la hora de interpretar los datos para reconstruir los hábitos alimentarios de los individuos del pasado (Fuller *et al.*, 2005).

Otra de las consideraciones que se debe realizar a la hora de reconstruir la dieta en el pasado, es que no basta con analizar solo a los humanos, es necesario incluir también los diferentes recursos alimentarios (animales y plantas), idealmente del mismo lugar geográfico y cronología, ya que cada ecosistema tiene variaciones propias. A su vez, las prácticas culturales de fertilización de los suelos, la irrigación y el uso y alimentación de los animales domésticos,

por dar algunos ejemplos, pueden variar en el tiempo y afectar la composición isotópica de toda la cadena alimentaria (De Niro & Epstein, 1981).

3. 2. Isótopos de Azufre

Los análisis de isótopos estables de azufre realizados sobre tejido esquelético y aplicados en el campo de la Arqueología son de momento poco habituales. Además de su uso sobre cabellos humanos (e.g. Aufderheide *et al.*, 1994), se ha avanzado mucho en la última década el análisis sobre colágeno óseo (Nehlich, 2015), permitiendo la aplicación potencial a una mayor cantidad de material disponible en el registro arqueológico global para obtener información tanto alimentaria como de uso del territorio (e.g. Nehlich *et al.*, 2012; Vika, 2009). Es más, la publicación de sus criterios de control de calidad sobre colágeno óseo sustenta metodológicamente la aplicación sobre hueso de este tipo de análisis (Nehlich & Richards, 2009). Además, a diferencia de lo que ocurre con el carbono y el nitrógeno, no existe una evidencia clara de enriquecimiento del azufre a lo largo de los peldaños de la cadena trófica (Richards, Fuller *et al.*, 2003).

El azufre medioambiental de la atmósfera y la biósfera se origina del azufre marino y terrestre, y se desplaza a través del ciclo del agua, la erosión y los movimientos tectónicos (Newton & Bottrell, 2007). Hay una enorme variación natural en el $\delta^{34}\text{S}$ medioambiental, aunque la mayoría de los valores oscilan entre -20‰ y $+30\text{‰}$ (Krouse, 1980). La proporción de los distintos isótopos estables del azufre en los tejidos humanos y animales ($\delta^{34}\text{S}$) está relacionada, como la de isótopos de carbono y nitrógeno, con los alimentos consumidos (Nehlich, 2015). No obstante, el ratio isotópico de azufre presente en los tejidos de un organismo deriva tanto del azufre orgánico de la dieta como de las contribuciones del azufre inorgánico del entorno (McCutchan *et al.*, 2003). En este sentido, las fuentes de azufre para las plantas son predominantemente el agua subterránea y la atmósfera. En los organismos superiores, los aminoácidos que contienen átomos de azufre (la cisteína y la metionina) entran en los organismos como proteínas a través de la dieta. A efectos de la investigación arqueológica, los resultados deberían reflejar tan solo la metionina dietética al no encontrarse cisteína en la proteína colágeno analizada (Eastoe, 1955).

12 | Los valores de isótopos de azufre de los tejidos de herbívoros reflejan sus fuentes de alimentación pero están fuertemente relacionados con los valores

de las plantas y los valores medioambientales (predominantemente la geología e hidrología locales). Y es que los animales terrestres pueden tener elevadas ratios de isótopos de azufre a pesar de nunca haber estado consumiendo peces, sino debido a su proximidad a la línea de costa y a la mezcla allí presente de azufre local con sulfatos del agua del mar (Craig *et al.*, 2006).

En este sentido, las mediciones de $\delta^{34}\text{S}$, en complemento con análisis de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, pueden proporcionar evidencia palaeodietaria y tienen el potencial de identificar migración y movilidad territorial (Richards, Fuller *et al.*, 2003). Los niveles de $\delta^{34}\text{S}$ en el mar tienen una media en torno a 20‰, así como los recursos que se encuentran en él, mientras que la corteza terrestre tiene unos valores cercanos al 0‰ (Rees, 1978). No obstante, el sulfato marino puede llegar a zonas de interior a través de partículas arrastradas por la brisa marina, la precipitación litoral y el efecto aerosol (O'Dowd *et al.*, 1997), por lo que es capaz de influir en los valores de $\delta^{34}\text{S}$ terrestres (fig. 5).

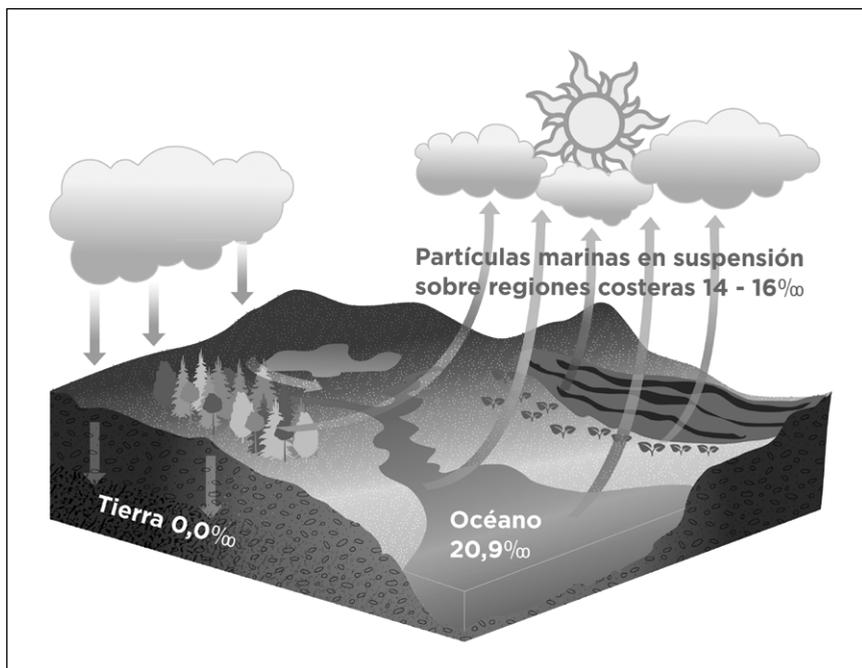


Figura 5 – Valores de $\delta^{34}\text{S}$ (‰) en distintas localizaciones geográficas y el efecto de aerosol marino

Elaboración: D. C. Salazar-García y M. Alarcón

En cualquier caso, se considera que los valores de $\delta^{34}\text{S}$ menores a 14‰ no están influenciados por las partículas marinas en suspensión y tampoco son el resultado del aporte de alimentos marinos (Richards *et al.*, 2001).

Además de discernir cercanía al mar o distinguir entre consumo de proteínas de origen terrestre o marino, los análisis de isótopos estables de azufre pueden contribuir a evaluar el aporte de peces de agua dulce en la impronta isotópica humana (e.g. Privat *et al.*, 2007; Linderholm *et al.*, 2008).

3. 3. Isótopos de hidrógeno y oxígeno

Los isótopos estables de hidrógeno y oxígeno se encuentran íntimamente vinculados a través del ciclo hidrológico. A escala global, se han observado variaciones predecibles en las composiciones isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de los ríos y aguas subterráneas a través de gradientes ambientales (Bowen, 2010). Puesto que estos recursos hídricos derivan de las precipitaciones, el principal factor de fraccionamiento que explica estas variaciones isotópicas es el efecto destilación que experimentan las lluvias con la elevación, latitud, temperatura y/o distancia con respecto a la fuente de humedad (Rozanski *et al.*, 1993) (fig. 6). Así, los análisis de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ sobre materiales arqueológicos orgánicos e inorgánicos constituyen una herramienta ubicua para determinar orígenes geográficos (e.g. Buzon *et al.*, 2011; Sharp *et al.*, 2003), ya que los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en dichos vestigios reflejarían la composición del agua local que es incorporada a través de la dieta o brebajes, o bien de los recursos hídricos utilizados en determinadas prácticas culturales (cocción, irrigación) (Blyth, 2001; Bowen *et al.*, 2009; Ehleringer *et al.*, 2008).

Tradicionalmente, los patrones de movilidad se han inferido a partir de análisis de $\delta^{18}\text{O}$ sobre bioapatitiva de huesos y/o esmalte dental, específicamente sobre carbonatos (CO_3) y fosfatos (PO_4). Esta aproximación asume que, a una temperatura corporal constante, los valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{CO}_3}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ se aproximan a la señal isotópica del agua corporal, la cual es una función de la composición isotópica de los recursos hídricos ingeridos —i.e. precipitaciones locales— (Bryant & Froelich, 1995). Sin embargo, la señal isotópica en carbonatos, principalmente en huesos, es considerada menos fidedigna en la medida que intercambian isótopos de oxígeno con el medio tras su deposición. En el esmalte dental, el proceso de mineralización confiere ventajas para los análisis de $\delta^{18}\text{O}$. Dado que este es un proceso discontinuo, ocurriendo a intervalos variables de duración a lo largo de la niñez (3 meses-12 años), análisis

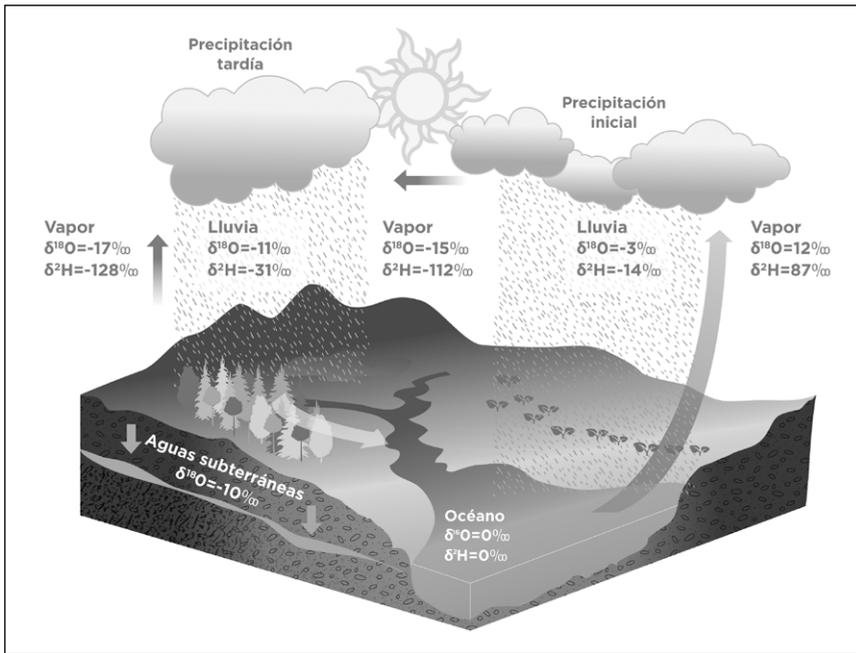


Figura 6 – Ciclo del agua con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en distintas localidades geográficas (Hoefs, 1997; Coplen *et al.*, 2000)
Elaboración: V. Silva-Pinto y M. Alarcón

seriados (i.e. capa por capa) permiten detectar cambios en el uso de diferentes fuentes de agua durante la infancia. Precisamente, en conjunto con análisis de $\delta^{15}\text{N}$ (Fogel *et al.*, 1989), es posible reconstruir patrones de lactancia y destete. El consumo de leche imprime una señal isotópica significativamente más enriquecida en $\delta^{18}\text{O}$ que el agua local, debido a la mayor temperatura corporal de la madre (Wright & Schwarcz, 1998).

En los últimos años han incrementado las caracterizaciones de las composiciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en uñas y pelo para evaluar orígenes geográficos (Bowen *et al.*, 2009; Ehleringer *et al.*, 2008; Sharp *et al.*, 2003). Esta aplicación se basa en la premisa de que estos tejidos incorporan la señal isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ a partir del agua y alimentos consumidos durante la síntesis de la queratina. En efecto, una vez que el agua meteórica (lluvias, ríos, agua subterránea) es incorporada a los productores primarios, su composición isotópica se propaga al resto de la trama trófica, imprimiendo así una señal geográfica a los consumidores.

Se ha demostrado que una fracción de átomos de hidrógeno en la queratina se intercambia con el agua atmosférica (De Niro & Epstein, 1981; Sharp *et al.*, 2003). Por otro lado, los trabajos de Ehleringer *et al.* (2008) y Bowen *et al.* (2009) sugieren que en aquellos individuos con dietas no locales, se oscurece la correlación entre las señales isotópicas del agua bebida y queratina en pelo. Estos dos aspectos pueden sesgar nuestras interpretaciones sobre orígenes geográficos. No obstante, el creciente interés por aplicar esta técnica ha llevado a desarrollar protocolos y consideraciones metodológicas que permiten superar estas limitaciones. En el caso del hidrógeno, las muestras son equilibradas por contacto durante 7 días con un material referencial del cual se conoce el valor de $\delta^2\text{H}$ de átomos no intercambiables (Bowen *et al.*, 2005). Mientras que para evaluar posibles efectos de dieta no local, los estudios pueden complementarse con análisis paralelos de composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (Bowen *et al.*, 2009).

3. 4. Isótopos de estroncio

Los análisis isotópicos de estroncio sobre registros arqueológicos han probado ser una poderosa herramienta para abordar preguntas relacionadas con patrones de movilidad territorial, residencia y comercio (Budd *et al.*, 2004; Slovak & Paytan, 2011).

En los océanos los ratios isotópicos de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) se mantienen constantes y homogéneos a nivel global en torno a 0,7091. Mientras, en los continentes estos fluctúan según la edad y el tipo de la roca madre (Bentley, 2006). Puesto que el ^{87}Sr se origina por el decaimiento radioactivo del isótopo ^{87}Rb , las rocas antiguas presentan valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ comparativamente más altos que aquellas de reciente origen. Por su parte, las variaciones de acuerdo a los tipos litológicos son el resultado de la combinación de las señales isotópicas y concentraciones de Sr idiosincrásicas de los minerales que constituyen las rocas (Bentley, 2006; Slovak & Paytan, 2011). Así, para aplicar esta metodología es necesario conocer la relación entre las litologías locales/regionales y sus composiciones isotópicas. En este sentido, es importante establecer una caracterización de los ratios de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las potenciales regiones fuentes mediante la implementación de líneas bases macrorregionales modernas (e.g. Knudson *et al.*, 2014; Price *et al.*, 2014) y/o revisiones bibliográficas (e.g. Wadleigh *et al.*, 1985; Wickman & Åberg, 1987).

Las proporciones de los distintos tipos de isótopos de estroncio dependen de la edad de la roca y del tipo de geología y pasan a los individuos a través de la alimentación. Como en este caso no existe el fraccionamiento isotópico, estas proporciones que incorpora el individuo serán las mismas que las de la geología del entorno donde vivió (fig. 7). Así pues, elaborando mapas de estroncio biodisponible de la región de estudio (estroncio en la cadena alimentaria, diferente al de las propias rocas, que no se consumían) y comparándolos con los valores obtenidos en el esmalte dentario en un momento concreto de la infancia, se puede contrastar los valores de dónde pasó la infancia el individuo con los del terreno donde ha sido encontrado para saber si era local o foráneo. Es más, si tenemos en cuenta que el esmalte de cada diente se forma a una edad diferente, si se analizasen varios dientes de un mismo individuo se podría obtener una secuencia temporal de varios años de su vida en relación con el terreno en el que habitó. Evidentemente, un requisito fundamental para esta aplicación es la existencia de heterogeneidad en las señales isotópicas dentro de una región, las cuales deben ser suficientemente diferentes a las distintivas entre sí.

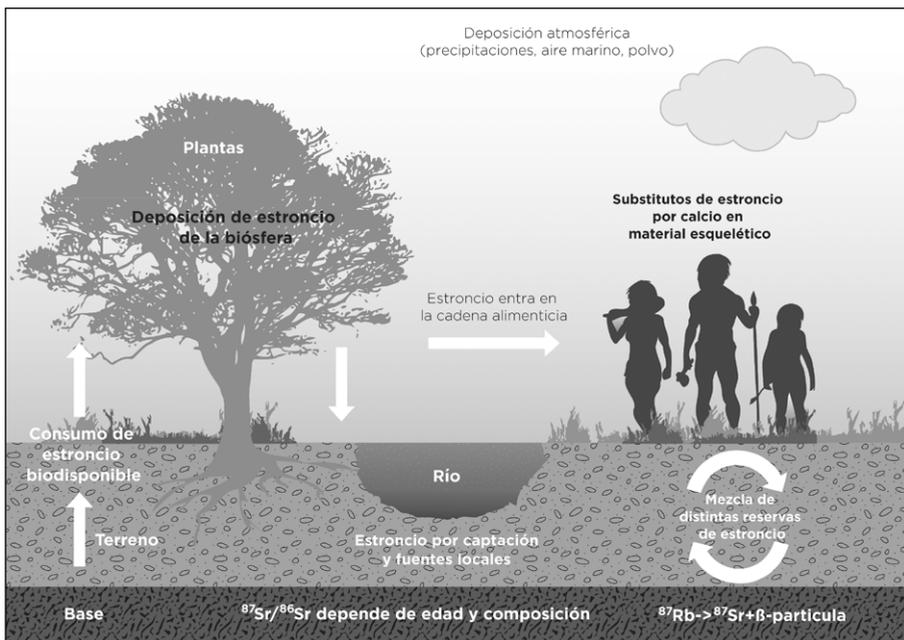


Figura 7 – El ciclo del estroncio (Modificado de Wilmes, 2015)

Elaboración: V Silva-Pinto y M. Alarcón

Una de las principales limitaciones de esta metodología se relaciona con el efecto del aerosol marino sobre las señales isotópicas terrestres, lo que eventualmente puede comprometer nuestras inferencias acerca de procedencias geográficas. Se ha verificado que el transporte y la depositación de sales marinas hacia el interior del continente a través de la neblina costera introduce señales isotópicas que se acercan al valor marino (Evans *et al.*, 2010; Hartman & Richards, 2014). De este modo, la relación entre litología y ratios isotópicos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ descrita para los sistemas terrestres se puede ver enmascarada dependiendo de la distancia a la costa y disminuyendo gradualmente en la medida que nos alejamos del borde costero.

4. Reflexiones finales

Hoy en día ya no se pueden entender ni la Arqueología ni la Antropología Física sin considerar las analíticas biomoleculares como una parte importante de las mismas. El desarrollo de un sinfín de métodos del mundo de las ciencias experimentales y su aplicación en el campo de la Arqueología que ha ocurrido durante estas últimas décadas ha supuesto un cambio de rumbo de esta última. Hoy en día no se deben realizar estudios amplios de subsistencia o territorialidad sin incluir las analíticas isotópicas en ellos; de hacerlo, sería una irresponsabilidad.

A su vez, es impensable que en la enseñanza de la Arqueología y Antropología no se ofrezcan asignaturas de Arqueología Biomolecular. Sin bases de conocimiento con las que contrastar la información de este tipo de analíticas, cada vez más frecuentes, se generan frecuentes errores a la hora de interpretar los datos y se debilitan los trabajos locales. A pesar de ello, se puede ver que desafortunadamente esto es lo que ocurre en muchas universidades del mundo de habla castellana, tanto en España como en Latinoamérica. Mientras que países del mundo anglosajón lo tienen claro y han apostado por el desarrollo y la consolidación en sus propios centros de dichas líneas de investigación como ejes del campo de la Arqueología; en nuestras universidades lo habitual es que ni siquiera se incluya su enseñanza en el currículo. Esta falta de inversión en el estudio y desarrollo de la Arqueología Biomolecular condena a estudiantes e investigadores a ser sujetos de la «colonización» anglosajona y convertirse en meros intermediarios que envían muestras al extranjero para ser analizadas por otras personas.

Hay que reaccionar. Con la inclusión en este pequeño manual, dirigido a estudiantes de Arqueología y Antropología, de un capítulo sobre análisis isotópicos, esperamos poder contribuir a llenar parcialmente esta laguna en la formación de las futuras y los futuros profesionales. Nos gustaría que no se limitara la lectura al mismo, si no que este sea un primer paso para las lectoras y los lectores en la búsqueda bibliográfica sobre este tipo de analíticas tan útiles para la reconstrucción de las pautas alimentarias y movilidad territorial en el pasado.

Agradecimientos

Agradecemos especialmente a Marcela Sepúlveda por invitarnos a formar parte de este libro, a Manuel Alarcón por las ilustraciones, a los proyectos FAC-MNHN 2016, Fondecyt #11150210, FONDAP/CONICYT #15110009 y Anillo SOC-1405, a la Generalitat Valenciana (VALi+d APOSTD 2014/123 y GV2015/060)) y a la Sociedad Max-Planck.

Referencias citadas

- AMBROSE, S. H., 1993 – Isotopic Analysis of Palaeodiets: Methodical and Interpretive Considerations. *In: Investigation of Ancient Human Tissue: Chemical Analysis in Anthropology* (M. K. Sandford, ed.): 59-130; Nueva York: Gordon & Breach.
- 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. *In: Prehistoric Human Bone: Archaeology at the Molecular Level*. (J. B. Lambert & G. Grupe, eds.): 1-37; Berlín: Springer-Verlag.
- AUFDERHEIDE, A. C., KELLEY, M. A., RIVERA, M., GRAY, L., TIESZEN, L. L., IVERSEN, E., KROUSE, H. R. & CAREVIC, A., 1994 – Contributions of chemical dietary reconstruction to the assessment of adaptation by ancient Highland immigrants (Alto-Ramirez) to coastal conditions at Pisagua, North Chile. *Journal of Archaeological Science*, **21** (4): 515-524.
- BENTLEY, R. A., 2006 – Strontium Isotopes from the Earth to the Archaeological Skeleton: A Review. *Journal of Archaeological Method and Theory*, **13** (3): 135-187.

- BLYTH, L., 2001 – Oxygen Isotope Analysis and Tooth Enamel Phosphate and Its Application to Archaeology. *Totem: The University of Western Ontario Journal of Anthropology*, **9** (1): 1-13.
- BOCHERENS, H., BILLIOU, D., CHARPENTIER, V. & MASHKOUR, M., 2000 – Palaeoenvironmental and Archaeological Implications of Bone and Tooth Isotopic Biogeochemistry (^{13}C , ^{15}N) in Southwestern Asia. In: *Archaeozoology of the Near East IV B* (M. Mashkour, A. M. Choyke, H. Buitenhuis & F. Poplin, eds.): 104-115; Groningen: ARC 32.
- BOWEN, G. J., 2010 – Isoscapes: Spatial Pattern in Isotopic Biogeochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **38**: 161-187.
- BOWEN, G. J., CHESSON, L., NIELSON, K., CERLING, T. E. & EHLERINGER, J. R., 2005 – Treatment methods for the determination of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of hair keratin by continuous-flow isotope-ratio mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **19** (17): 2371-2378.
- BOWEN, G. J., EHLERINGER, J. R., CHESSON, L. A., THOMPSON, A. H., PODLESIAK, D. W. & CERLING, T. E., 2009 – Dietary and physiological controls on the hydrogen and oxygen isotope ratios of hair from mid-20th century indigenous populations. *American Journal of Physical Anthropology*, **139** (4): 494-504.
- BRYANT, J. D. & FROELICH, P. N., 1995 – A model of oxygen isotope fractionation in body water of large mammals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59** (21): 4523-4537.
- BUDD, P., MILLARD, A., CHENERY, C., LUCY, S. & ROBERTS, C., 2004 – Investigating population movement by stable isotope analysis: a report from Britain. *Antiquity*, **78** (299): 127-141.
- BUZON, M. R., CONLEE, C. A. & BOWEN, G. J., 2011 – Refining oxygen isotope analysis in the Nasca region of Peru: An investigation of water sources and archaeological samples. *International Journal of Osteoarchaeology*, **21** (4): 446-455.
- CHISHOLM, B. S., NELSON, D. E. & SCHWARTZ, H. P., 1982 – Stable-carbon isotope ratios as a measure of marine versus terrestrial protein in ancient diets. *Science*, **216** (4550): 1131-1132.
- COPLEN, T. B., HERCZEG, A. L. & BARNES, C., 2000 – Isotope engineering: using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems. In: *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* (P. G. Cook & A. L. Herczeg, eds.): 79-110; Boston: Kluwer Academic Publishers.

- CRAIG, O. E., ROSS, R., ANDERSEN, S. H., MILNER, N. & BAILEY, G. N., 2006 – Focus: sulphur isotope variation in archaeological marine fauna from northern Europe. *Journal of Archaeological Science*, **33** (11):1642-1646.
- DE NIRO, M. J., 1985 – Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. *Nature*, **317** : 806-809.
- DE NIRO, M. J. & EPSTEIN, S., 1978 – Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **42**: 495-506.
- DE NIRO, M. J. & EPSTEIN, S., 1981 – Hydrogen isotope ratios of mouse tissues are influenced by a variety of factors other than diet. *Science*, **214**: 1374-1375.
- DE NIRO, M. J. & WEINER, S., 1988 – Chemical, enzymatic and spectroscopic characterization of “collagen” and other organic fractions from prehistoric bones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **52** (9): 2197-2206.
- EASTOE, J. E., 1955 – The amino acid composition of mammalian collagen and gelatin. *Biochemical Journal*, **61** (4): 589-600.
- 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.
- EVANS, J. A., MONTGOMERY, J., WILDMAN, G. & BOULTON, N., 2010 – Spatial variations in biosphere $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ in Britain. *Journal of the Geological Society*, **167**: 1-4.
- FIORENZA, L., BENAZZI, S., HENRY, A. G., SALAZAR-GARCÍA, D. C., BLASCO, R., PICIN, A., WROE, S. & KULLMER, O., 2015 – To meat or not to meat? New perspectives on Neanderthal ecology. *American Journal of Physical Anthropology*, **156**: 43-71.
- FOGEL, M., TUROSS, N. & OWSLEY, D. W., 1989 – Nitrogen isotope tracers of human lactation in modern and archaeological populations. *Annual report of the Director, Geophysical Laboratory: 1988-1989*: 111-117; Washington, D. C.: Carnegie Institution of Washington.
- FRY, B., 2006 – *Stable Isotope Ecology*, 308 pp; Nueva York: Springer Verlag.
- FULLER, B. T., FULLER, J. L., HARRIS, D. A. & HEDGES, R. E. M., 2006 – Detection of breastfeeding and weaning in modern human infants with carbon and nitrogen stable isotope ratios. *American Journal of Physical Anthropology*, **129** (2): 279-293.

- FULLER, B. T., FULLER, J. L., SAGE, N. E., HARRIS, D. A., O'CONNELL, T. C. & HEDGES, R. E. M., 2005 – Nitrogen balance and $\delta^{15}\text{N}$: why you're not what you eat during nutritional stress. *Rapid communications in mass spectrometry*, **19** (18): 2497-2506.
- GIL, A. F., 2003 – Zea mays on South American periphery: chronology and dietary importance. *Current Anthropology*, **44** (2): 295-300.
- GIL, A. F., NEME, G. A., TYKOT, R. H., NOVELLINO, P., CORTEGOSO, V. & DURÁN, V., 2009 – Stable Isotopes and Maize Consumption in Central Western Argentina. *International Journal of Osteoarchaeology*, **19** (2): 215-236.
- HARTMAN, G. & RICHARDS, M., 2014 – Mapping and defining sources of variability in bioavailable strontium isotope ratios in the Eastern Mediterranean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **126**: 250-264.
- HEDGES, R. E. M., CLEMENT, J. G., THOMAS, C. D. L. & O'CONNELL, T. C., 2007 – Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. *American Journal of Physical Anthropology*, **133** (2): 808-816.
- HOEFS, J., 1997 – *Stable Isotope Geochemistry*, 389 pp.; Berlín: Springer-Verlag.
- HOWLAND, M. R., CORR, L. T., YOUNG, S. M. M., JONES, V., JIM, S., VAN DER MERWE, N. J., MITCHELL, A. D. & EVERSHERD, R. P., 2003 – Expression of the dietary isotope signal in the compound-specific delta-13 values of pig bone lipids and amino acids. *International Journal of Osteoarchaeology*, **13**: 54-65.
- JAOUEN, K., SZPAK, P. & RICHARDS, M. P., 2016 – Zinc Isotope Ratios as Indicators of Diet and Trophic Level in Arctic Marine Mammals. *Plos One*, **11** (3): 1-13.
- JENKINS, S. G., PARTRIDGE, S. T., STEPHENSON, T. R., FARLEY, S. D. & ROBBINS, C. T., 2001 – Nitrogen and Carbon Isotope Fractionation Between Mothers, Neonates, and Nursing Offspring. *Oecologia*, **129** (3): 336-341.
- JIM, S., JONES, V., AMBROSE, S. H. & EVERSHERD, R. P., 2006 – Quantifying dietary macronutrient sources of carbon for bone collagen biosynthesis using natural abundance stable carbon isotope analysis. *British Journal of Nutrition*, **95** (6): 1055-1062.
- KATZENBERG, M. A., SCHWARCZ, H. P., KNYF, M. & MELBYE, F. J., 1995 – Stable Isotope Evidence for Maize Horticulture and Paleodiet in Southern Ontario, Canada. *American Antiquity*, **60** (2): 335-350.

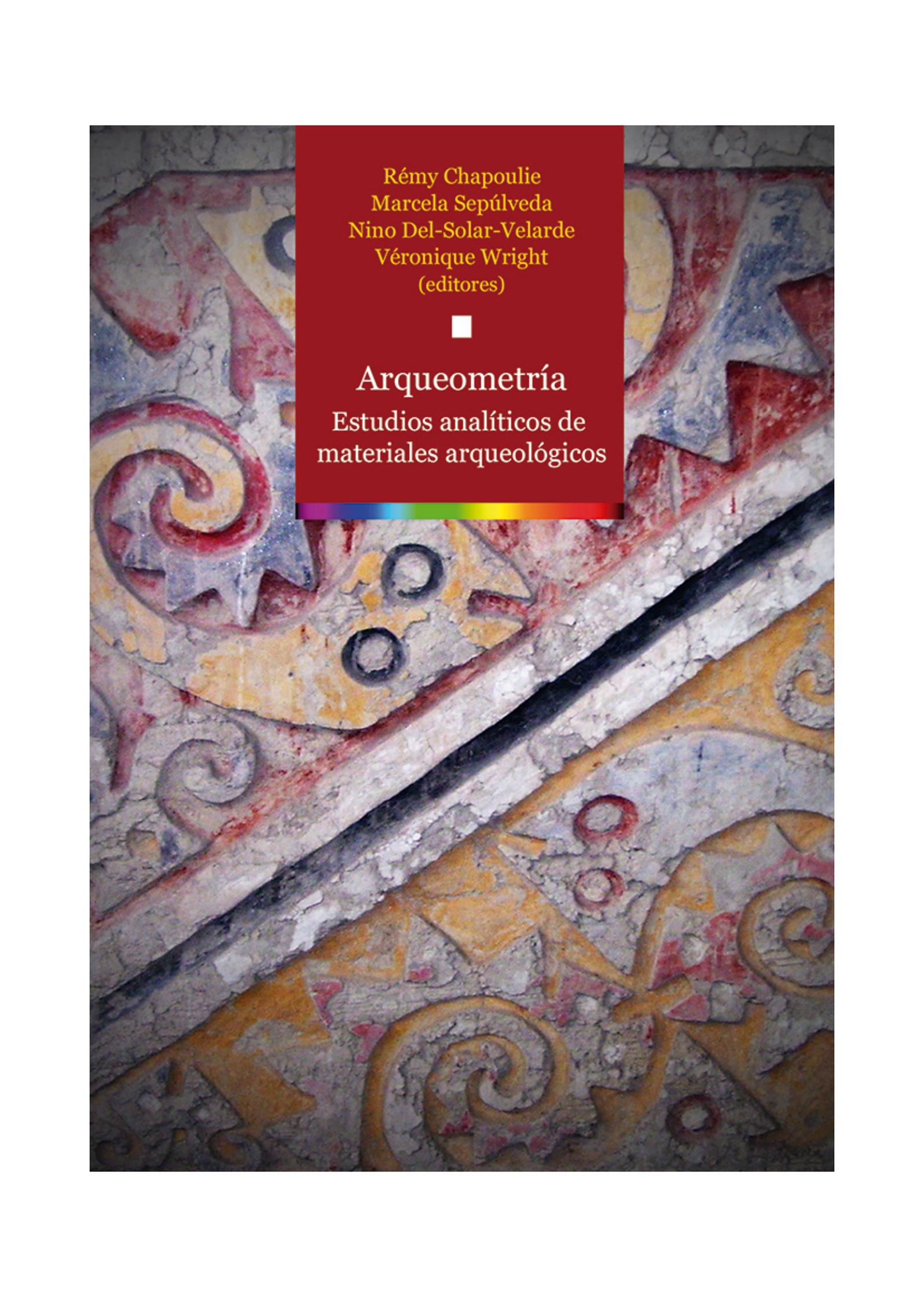
- KNUDSON, K. J., WEBB, E., WHITE, C. & LONSTAFFE, F. J., 2014 – Baseline data for Andean paleomobility research: a radiogenic strontium isotope study of modern Peruvian agricultural soils. *Archaeological and Anthropological Sciences*, **6** (3): 205-219.
- KROUSE, H. R., 1980 – Sulphur isotopes in our environment. *In: Isotope Geochemistry The Terrestrial Environment* (P. Fritz & J. Ch. Fontes, eds.): 435-471; Amsterdam: Elsevier.
- LEATHERDALE, A. J. K., 2013 – Interpreting Stable Carbon and Nitrogen Isotope Ratios in Archaeological Remains: An Overview of the Processes Influencing the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ Values of Type I Collagen. *Totem: The University of Western Ontario Journal of Anthropology*, **21** (1): 39-50.
- LEE-THORP, J. A., 2008 – On isotopes and old bones. *Archaeometry*, **50** (6): 925-950.
- LINDERHOLM, A., JONSON, C. H., SVENSK, O. & LIDÉN, K., 2008 – Diet and status in Birka: stable isotopes and grave goods compared. *Antiquity*, **82** (316): 446-461.
- MACKO, S. A., ENGEL, M. H., ANDRUSEVICH, V., LUBEC, G., O'CONNELL, T. C. & HEDGES, R. E., 1999 – Documenting the diet in ancient human populations through stable isotope analysis of hair. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **354** (1379): 65-76.
- MAKAREWICZ, C. A. & SEALY, J., 2015 – Dietary reconstruction, mobility, and the analysis of ancient skeletal tissues: expanding the prospects of stable isotope research in archaeology. *Journal of Archaeological Science*, **56**: 146-158.
- McCUTCHAN, J. H., Jr., LEWIS, W. M., KENDALL, C. & MCGRATH, C. C., 2003 – Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos*, **102**: 378-390.
- METCALFE, J. Z., LONGSTAFFE, F. J. & ZAZULA, G. D., 2010 – Nursing, Weaning, and Tooth Development in Woolly Mammoths from Old Crow, Yukon, Canada: Implications for Pleistocene Extinctions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **298** (3-4): 257-270.
- MINAGAWA, M. & WADA, E., 1984 – Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between ^{15}N and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48** (5): 1135-1140.
- NEHLICH, O., 2015 – The application of sulphur isotope analyses in archaeological research: a review. *Earth-Science Reviews*, **142**: 1-17.

- NEHLICH, O. & RICHARDS, M. P., 2009 – Establishing collagen quality criteria for sulphur isotope analysis of archaeological bone collagen. *Archaeological and Anthropological Sciences*, **1** (1): 59-75.
- NEHLICH, O., FULLER, B. T., MÁRQUEZ-GRANT, N. & RICHARDS, M. P., 2012 – Investigation of Diachronic Dietary Patterns on the Islands of Ibiza and Formentera, Spain: Evidence from Sulphur Stable Isotope Ratio Analysis. *American Journal of Physical Anthropology*, **149** (1): 115-124.
- NEWTON, R. & BOTTRELL, S., 2007 – Stable isotopes of carbon and sulphur as indicators of environmental change: past and present. *Journal of the Geological Society*, **164**: 691-708.
- O'CONNELL, T. C. & HEDGES, R. E. M., 1999 – Isotopic Comparison of Hair and Bone: Archaeological Analyses. *Journal of Archaeological Science*, **26** (6): 661-665.
- O'CONNELL, T. C., HEDGES, R. E. M., 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.
- O'CONNELL, T., KNEALE, C., TASEVSKA, N. & KUHNLE, G., 2012 – The diet-body offset in human nitrogen isotopic values: A controlled dietary study. *American Journal of Physical Anthropology*, **149** (3): 426-434.
- O'DOWD, C. D., SMITH, M. H., CONSTERDINE, I. E. & LOWE, J. A., 1997 – Marine aerosol, sea salt, and the marine sulphur cycle: a short review. *Atmospheric Environment*, **31** (1): 73-80.
- O'LEARY, M. H., 1981 – Carbon Isotope Fractionation in Plants. *Phytochemistry*, **20** (4): 553-567.
- O'LEARY, M. H., 1988 – Carbon Isotopes in Photosynthesis. *Bioscience*, **38** (5): 328-336.
- POULSON, S. R., KUZMINSKY, S. C., SCOTT, G. R., STANDEN, V. G., ARRIAZA, B., MUÑOZ, I. & DORIO, L., 2013 – Paleodiet in northern Chile through the Holocene: extremely heavy $\delta^{15}\text{N}$ values in dental calculus suggest a guano-derived signature? *Journal of Archaeological Science*, **40**: 4576-4585.
- POWER, R. C., SALAZAR-GARCÍA, D. C., WITTIG, R. M. & HENRY, A. G., 2014 – Assessing use and suitability of scanning electron microscopy in the analysis of microremains in dental calculus. *Journal of Archaeological Science*, **49** (1): 160-169.

- POWER, R. C., SALAZAR-GARCÍA, D. C., WITTIG, R. M., FREIBURG, M. & HENRY, A. G., 2015 – Dental calculus evidence of Tai Forest Chimpanzee plant consumption and life history transitions. *Scientific Reports*, **5**: 15161.
- PRICE, D. T., FREI, K. M. & NAUMANN, E., 2014 – Isotopic Baselines in the North Atlantic Region. *Journal of the North Atlantic*, **7**: 103-136.
- PRIVAT, K. L., O'CONNELL, T. C. & HEDGES, R. E. M., 2007 – The distinction between freshwater- and terrestrial-based diets: methodological concerns and archaeological applications of sulfur stable isotope analysis. *Journal of Archaeological Science*, **34** (8): 1197-1204.
- REES, C. E., 1978 – Sulphur isotope measurements using SO₂ and SF₆. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **42** (4): 383-389.
- RICHARDS, M. P., FULLER, B. T. & HEDGES, R., 2001 – Sulphur isotopic variation in ancient bone collagen from Europe: implications for human palaeodiet, residence mobility, and modern pollutant studies. *Earth and Planetary Science Letters*, **191** (3-4): 185-190.
- RICHARDS, M. P., PRICE, T. D. & KOCH, E., 2003 – Mesolithic and Neolithic subsistence in Denmark: new stable isotope data. *Current Anthropology*, **44** (2): 288-295.
- 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**: 37-45.
- ROZANSKI, K., ARAGUÁS-ARAGUÁS, L. & GONFIANTINI, R., 1993 – Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. In: *Climate Change in Continental Isotopic Records* (P. K. Swart, K. C. Lohmann, J. Mckenzie & S. Savin, eds): 1-36; Washington, D. C.: American Geophysical Union.
- SALAZAR-GARCÍA, D. C., 2015 – Utilidad De los Análisis Isotópicos Sobre Restos Esqueléticos en Arqueología: Dieta, Destete y Movilidad Territorial. In: *Quaderns Dels Museus Municipals de València 3, Actuacions sobre el patrimoni arqueològic de la Comunitat Valenciana* (Ll. Alapont, J. Martí & F. Tendero): 369-379; Valencia.
- SALAZAR-GARCÍA, D. C., RICHARDS, M., NEHLICH, O. & HENRY, A., 2014 – Dental calculus is not equivalent to bone collagen for isotope analysis: a comparison between carbon and nitrogen stable isotope analysis of bulk dental calculus, bone and dentine collagen from same individuals from the Medieval site of El Raval (Alicante, Spain). *Journal of Archaeological Science*, **47**: 70-77.

- SALAZAR-GARCÍA D. C., VIVES-FERRÁNDIZ J., FULLER B. & RICHARDS M. P., 2010 – Alimentación estimada de la población del Castellet de Bernabé (ss. V-III a. C.) mediante el uso de ratios de isótopos estables de C y N. *Sagvntvm Extra*, **9**: 313-322.
- SALAZAR-GARCÍA, D. C., AURA, J. E., OLÀRIA, C. R., TALAMO, S., MORALES, J. V. & RICHARDS, M. P., 2014 – Isotope evidence for the use of marine resources in the Eastern Iberian Mesolithic. *Journal of Archaeological Science*, **42**: 231-240.
- SALAZAR-GARCÍA, D. C., POWER, R. C., SANCHIS-SERRA, A., VILLAVERDE, V., WALKER, M. J. & HENRY, A. G., 2013 – Neanderthal diets in central and southeastern Mediterranean Iberia. *Quaternary International*, **318**: 3-18.
- SCHOELLER, D. A., 1999 – Isotope fractionation: why aren't we what we eat? *Journal of Archaeological Science*, **26** (6): 667-673.
- SCHOENINGER, M. J. & DE NIRO, M., 1984 – Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48** (4): 625-639.
- SCHOENINGER, M., DE NIRO, M. & TAUBER, H., 1983 – Stable nitrogen isotope ratios of bone collagen reflect marine and terrestrial components of prehistoric human diet. *Science*, **220**: 1381-1383.
- SCHWARCZ, H. P., MELBYE, J., KATZENBERG, M. A. & KNYF, M., 1985 – Stable Isotopes in Human Skeletons of Southern Ontario: Reconstructing Paleodiet. *Journal of Archaeological Science*, **12**: 187-206.
- 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.
- SLOVAK, N. M. & PAYTAN, A., 2011 – Chapter 35: Applications of Sr Isotopes in Archaeology. In: *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Advances in Isotope Geochemistry* (M. Baskaran, ed.): 743-768; Berlín: Springer.
- SMITH, B. N., & EPSTEIN S., 1971 – Two Categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Ratios for Higher Plants. *Plant Physiology*, **47** (3): 380-384.
- TYKOT, R. H., 2006 – Isotope Analyses and the Histories of Maize. In: *Histories of Maize: Multidisciplinary Approaches to the Prehistory, Linguistics, Biogeography, Domestication, and Evolution of Maize* (J. E. Staller, R. H. Tykot & B. F. Benz, eds.): 131-142; Boston: Elsevier Academic Press.

- UBELAKER, D. H., 1979 – *Human Skeletal Remains: Excavation, Analysis and Interpretation*, 172 pp.; Washington, D. C.: Smithsonian Institute Press.
- VAN DER MERWE, N. J. & VOGEL, J. C., 1978 – ^{13}C Content of Human Collagen as a Measure of Prehistoric Diet in Woodland North America. *Nature*, **276**: 815-816.
- VAN KLINKEN, G. J., 1999 – Bone Collagen Quality Indicators for Palaeodietary and Radiocarbon Measurements. *Journal of Archaeological Science*, **26** (6): 687-695.
- VIKA, E., 2009 – Strangers in the grave? Investigating local provenance in a Greek Bronze Age mass burial using $\delta^{34}\text{S}$ analysis. *Journal of Archaeological Science*, **36** (9): 2024-2028.
- WADLEIGH, M. A., VEIZER, J. & BROOKS, C., 1985 – Strontium and its Isotopes in Canadian Rivers: Fluxes and Global Implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **49** (8): 1727-1736.
- WICKMAN, F. E. & ÅBERG, G., 1987 – Variations in the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Ratio in Lake Waters from Central Sweden. *Nordic Hydrology*, **18** (1): 21-32.
- WILMES, M., 2015 – Strontium isotope tracing of prehistoric human mobility in France. Ph.D. Thesis. The Australian National University.
- WRIGHT, L. E. & SCHWARCZ, H. P., 1998 – Stable carbon and oxygen isotopes in human tooth enamel: Identifying breastfeeding and weaning in prehistory. *American Journal of Physical Anthropology*, **106** (3): 411.

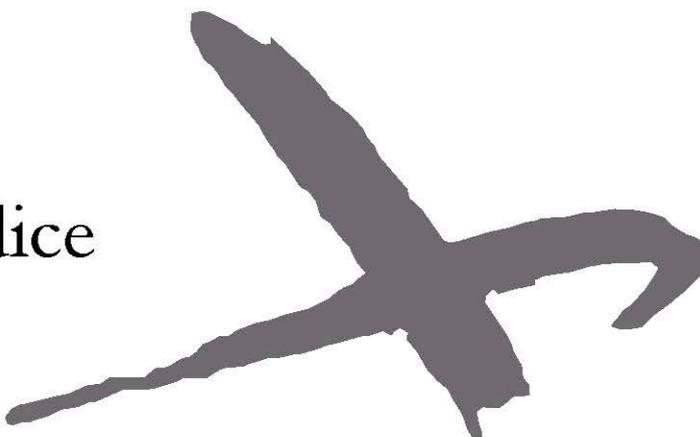


Rémy Chapoulie
Marcela Sepúlveda
Nino Del-Solar-Velarde
Véronique Wright
(editores)



Arqueometría
Estudios analíticos de
materiales arqueológicos

Índice



PRÓLOGO	11
RÉMY CHAPOULIE & MARCELA SEPÚLVEDA	
INTRODUCCIÓN	15
MARCELA SEPÚLVEDA & RÉMY CHAPOULIE	
PRIMERA PARTE. TÉCNICAS, PROTOCOLOS Y APLICACIONES	25
I. ANÁLISIS ATÓMICOS Y ELEMENTALES	27
RÉMY CHAPOULIE & NINO DEL-SOLAR-VELARDE	
Capítulo 1. Microscopía Electrónica de Barrido, Espectrometría de Rayos X y Catodoluminiscencia	29
RÉMY CHAPOULIE	
Capítulo 2. Catodoluminiscencia para el estudio de cerámicas y otros materiales inorgánicos	45
JOSÉ LUIS RUVALCABA SIL	
Capítulo 3. Análisis elemental mediante técnicas basadas en rayos X característicos: Fluorescencia de Rayos X y Emisión de Rayos X Inducida por Partículas	61
MICHAEL D. GLASCOCK & MATTHEW T. BOULANGER	
Capítulo 4. Análisis por Activación Neutrónica	91
VERÓNICA SILVA-PINTO, EUGENIA M. GAYO & DOMINGO C. SALAZAR-GARCÍA	
Capítulo 5. Isótopos estables	111
RENAUD JOANNES-BOYAU	
Capítulo 6. Ablación Láser mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente aplicada a la investigación arqueológica y a la conservación del patrimonio material	139

BRUNO BOUSQUET	
Capítulo 7. Espectroscopía de Plasma Inducido por Láser	157
II. ANÁLISIS MOLECULARES Y CRISTALOGRAFICOS	169
MARCELO M. CAMPOS-VALLETTE	
Capítulo 8. Espectroscopía Vibracional Infrarroja y Raman	171
MICHEL DUBUS	
Capítulo 9. Difracción de los rayos X	189
MARTA S. MAIER	
Capítulo 10. Cromatografía Gaseosa y Cromatografía Líquida de Alta Resolución	211
FLORÉAL DANIEL	
Capítulo 11. Imágenes hiperespectrales	229
III. TÉCNICAS DE DATACIÓN	255
CHRISTELLE LAHAYE & GUILLAUME GUÉRIN	
Capítulo 12. Métodos de datación por luminiscencia	257
CHRISTOPHE FALGUÈRES & MATHIEU DUTTINE	
Capítulo 13. Resonancia del Espín Electrónico	287
SOPHIE BLAIN	
Capítulo 14. Dendrocronología en madera arqueológica	311
CHRISTINE OBERLIN	
Capítulo 15. Datación por carbono 14	329
MIRIAM GÓMEZ-PACCARD	
Capítulo 16. Archeomagnetismo: aplicación a la datación de materiales arqueológicos	349
SEGUNDA PARTE. MATERIALES Y CASOS DE ESTUDIO	365
I. MINERALES	367
MARCELA SEPÚLVEDA & VÉRONIQUE WRIGHT	
Capítulo 17. Pigmentos, pinturas rupestres y murales	369
MARIE ORANGE, FRANÇOIS-XAVIER LE BOURDONNEC & LUDOVIC BELLOT-GURLET	
Capítulo 18. Análisis de procedencia de la obsidiana en Arqueología: 50 años de avances metodológicos	393
II. CERÁMICA	413
NINO DEL-SOLAR-VELARDE, NADIA CANTIN & RÉMY CHAPOULIE	
Capítulo 19. Cerámica	415

GIOVANA MARIA MANGUEIRA, SIMONNE TEIXEIRA, FABIOLA ANDRÉA SILVA & ROBERTO WEIDER DE ASSIS FRANCO Capítulo 20. Arqueometría en cerámicas mediante Resonancia Paramagnética Electrónica	435
AYED BEN AMARA Capítulo 21. Cerámica vidriada	451
GUILLERMO ADRIÁN DE LA FUENTE Capítulo 22. Estudios petrográficos en cerámicas arqueológicas: una breve revisión crítica	467
MARTA S. MAIER Capítulo 23. Identificación de lípidos en bienes culturales	489
III. METALES	505
MARIA FILOMENA GUERRA Capítulo 24. El trabajo de los metales preciosos en el área andina: aportes arqueométricos	507
MICHEL PERNOT Capítulo 25. Cobre, aleaciones y sociedades antiguas	525
PHILIPPE DILLMANN Capítulo 26. Arqueometría de metales ferrosos	545
TERCERA PARTE. TÉCNICAS DE PROSPECCIÓN EN ARQUEOLOGÍA	565
VIVIEN MATHÉ Capítulo 27. La prospección geofísica en un contexto arqueológico	567
ÉLISE FOVET, CLÉMENT LAPLAIGE, LAURE NUNINGER, MURIELLE GEORGES-LEROY & CATHERINE FRUCHART Capítulo 28. LiDAR aerotransportado	593
LUIS ALBERTO BAREA PINGARRÓN Capítulo 29. El estudio de residuos químicos en materiales porosos	613
LUIS JAIME CASTILLO BUTTERS Capítulo 30. Drones y Arqueología. Vuelos e imágenes	629
SOBRE LOS AUTORES	663