

Peter Schaaf
Gabriela Solís
Teodoro Hernández
Gerardo Arrieta
Laboratorio Universitario de
Geoquímica Isotópica, UNAM
Peter Horn (†)
Universidad de Múnich, Alemania
Linda Manzanilla
Instituto de Investigaciones
Antropológicas, UNAM

20 años de estudios de migración humana con isótopos de estroncio en México: afinación, avances y aplicaciones en Teopancazco

Resumen: Varios métodos isotópicos tienen hoy en día una aplicación amplia en ciencias antropológicas y arqueológicas. Desde 1980 se ha usado la isotopía de estroncio con su relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en dientes y huesos en estudios de migración humana, y más reciente, también en vertebrados. Sin embargo, en el transcurso de los últimos 40 años y con el aumento de la experiencia laboral, se han encontrado evidencias de contaminación secundaria del material investigado por procesos diagenéticos durante el tiempo de sepultura del individuo o por efectos de enfermedades dentales mientras la persona todavía vivía. Estos procesos pueden complicar la interpretación en el contexto de la migración. Para superar este problema, en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica de la UNAM se desarrolló y se afinó una técnica de lixiviado en tres pasos en los esmaltes. Este protocolo se aplicó por primera vez en dientes procedentes de Teopancazco, Teotihuacan, con resultados prometedores, y se recomienda emplear esta técnica en todos los estudios de migración para evitar conclusiones equivocadas.

Palabras clave: isotopía de estroncio, migración humana, diagénesis, lixiviado, Teopancazco, Teotihuacan.

Abstract: Presently, isotopic methods are widely used in anthropological and archaeological sciences. Since approximately 1980, strontium isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) have been determined in bone and teeth samples to facilitate human migration studies as well as more recently in vertebrate fossils. However, with increasing analytical experience over the last 40 years, secondary strontium contaminations became apparent in the analyzed materials. These are caused by various diagenetic processes after burial or by events during the lifetime of the individual, such as tooth disease. Both can lead to misinterpretations in the migration context. To overcome this problem, a three-step leaching protocol for tooth enamel was developed and improved in the Lugis isotope lab of UNAM. This procedure was first applied in samples from Teopancazco (Teotihuacan) with auspicious results and should be used today in all migration studies involving tooth enamel to avoid erroneous interpretations.

Keywords: Isotopes of strontium, Human migration, diagenesis, lixiviation, Teopancazco, Teotihuacan.

Los estudios arqueológicos se ven cada vez más beneficiados por técnicas analíticas originalmente desarrolladas en diversas disciplinas de las ciencias naturales; por ejemplo, la química, la física o las ciencias de la Tierra. Métodos isotópicos para obtener edades de restos humanos o de cerámicas con los métodos de radiocarbono y de termo/foto luminiscencia, se aplican hoy rutinariamente en proyectos arqueológicos y antropológicos. Sin embargo, sus primeras aplicaciones tuvieron lugar en investigaciones geológicas para datar eventos volcánicos. El primer fechamiento con el método de radiocarbono se llevó a cabo en un afloramiento del flujo de lava del Xitle cerca de la pirámide de Cuicuilco, a inicios de los años cincuenta del siglo pasado (Arnold y Libby, 1951), dando mutuamente resultados novedosos para los geólogos y los arqueólogos. El método isotópico de Rb-Sr se aplicó la primera vez en los años treinta para fechar rocas y minerales (Hahn y Walling, 1938) y poco después para investigaciones de procedencia de magmas, etc. En los años ochenta se detectó el potencial de la isotopía de estroncio (Sr) en huesos y dientes humanos para estudios de migración humana (Krueger, 1985) y fue aplicada por Ericson (1985) en

una investigación piloto con indios prehistóricos de la población Chumash en California.

En México, a finales del siglo pasado, la Dra. Linda Manzanilla fue la primera en adaptar esta metodología en huesos y esmaltes de entierros de Teotihuacan, en cooperación con investigadores de la Universidad de Wisconsin (Price *et al.*, 2000). En 2003 empezó la colaboración de la Dra. Manzanilla con el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (Lugis) de la UNAM, la cual ha sido muy fructífera para ambas partes, con la publicación de artículos en libros (Manzanilla *et al.*, 2012; Schaaf *et al.*, 2012; Solís *et al.*, 2017) y tesis de licenciatura, maestría y de doctorado (Lailson, 2009; Barrera, 2014; Sánchez, 2020; Ruiz, 2021).

A continuación, se presenta una breve descripción del método y su afinación para eliminar contaminaciones secundarias en los esmaltes de origen biogénico, diagenético y antropogénico, desarrollados por distintos autores y en el Lugis. También se presentan resultados representativos que demuestran la eficiencia de dichos procesos de purificación en muestras seleccionadas de Teopancazco, un centro de barrio multiétnico de Teotihuacan (Manzanilla, 2017).

¿Cómo se pueden usar los isótopos de Sr para estudios de migración humana?

El estroncio es un elemento alcalino térreo con cuatro isótopos naturales (^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr y ^{88}Sr), de los cuales el ^{87}Sr contiene una contribución radiogénica producida por el decaimiento β^- del isótopo padre, el ^{87}Rb (rubidio). Si una roca o un mineral contiene mucho Rb y adicionalmente su edad es alta, la cantidad de ^{87}Sr y su relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ son altas. De modo contrario, tenemos valores bajos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Esto constituye la base para fechamientos o estudios petrogenéticos por el sistema isotópico de Rb-Sr (Faure, 1986). Rocas de procedencia del manto superior de la Tierra llevan $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ bajo (aprox. 0.70703), rocas de la corteza continental pueden tener $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7150$. Los suelos son productos del intemperismo de estas rocas.

En el caso de los restos humanos, la isotopía de estroncio en huesos refleja aproximadamente la composición isotópica de la litología en la que la persona subsistió antes de su muerte. Si una persona vivió, por ejemplo, en Yucatán (plataforma carbonatada) y migró al Altiplano central de México (Faja Neovolcánica), su firma isotópica de Sr en los huesos cambia en unos 5-10 años al nuevo ambiente. Este canje es más rápido en huesos porosos, seguido por las costillas, los fémures, y más lento en los cráneos (Horn *et al.*, 1997). Por otro lado, el $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del esmalte del diente, el material más duro del cuerpo humano, se obtiene durante la niñez y permanece, en general, como un sistema cerrado después de su formación (Bentley, 2006). En la antigüedad, la nutrición de la gente era de origen local y su composición isotópica de Sr en hueso y esmalte se obtuvo de alimentos de sus respectivos suelos. Por ello,



Fig. 1 Ciclo de entradas y salidas de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; flechas rojas) a diferentes reservorios (letras negritas). Letras pequeñas corresponden a procesos que modifiquen la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Modificado de Bataille *et al.* (2020).

si las firmas isotópicas de huesos y esmaltes coinciden es muy probable que no haya habido migración de larga distancia. Si el $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del esmalte no coincide, una base de datos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en rocas y suelos para México y Centroamérica ayuda a identificar posibles regiones de origen (véase Schaaf *et al.*, 2012). La figura 1 muestra el ciclo de la incorporación de estroncio al cuerpo humano en diferentes ambientes.

Procesos secundarios que pueden cambiar la isotopía original en huesos y esmaltes

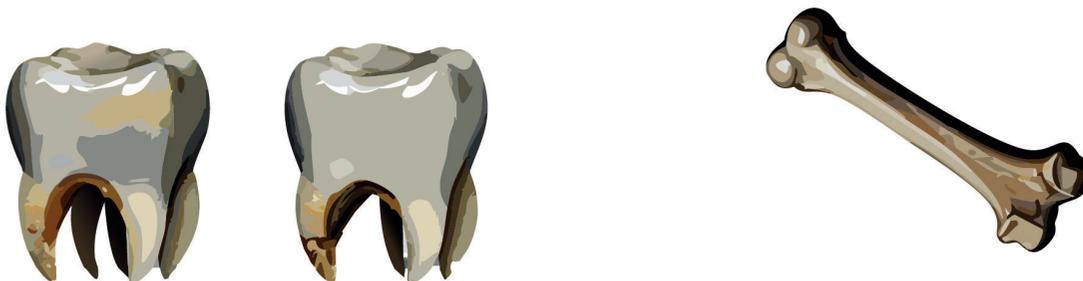
En la práctica existen varios procesos físico-químicos que pueden modificar las firmas isotópicas de Sr en huesos y dientes, lo cual puede llegar a interpretaciones equivocadas sobre si una persona era migrante o no.

Químicamente, huesos y esmaltes presentan la composición de hidroxiapatito ($\text{Ca}_9(\text{PO}_4)_{4.5}(\text{CO}_3)_{1.5}(\text{OH})$). Los huesos cuentan, en comparación con los esmaltes, con una estructura más porosa, cristales más grandes y son menos duros (figura 2).

Consecuentemente, son más sensibles a alteraciones secundarias como la diagénesis, que puede ocurrir en condiciones húmedas, típicas, por ejemplo, en el Altiplano central mexicano. Soluciones acuosas de los sedimentos y con iones de elementos en suelos alrededor de un entierro, pueden favorecer un intercambio químico con los huesos y producir nuevos minerales en los mismos. Carbonatos y apatitos de los huesos se pueden cambiar de esta manera, aunque conservan frecuentemente su forma exterior y, como resultado, el $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del hueso puede resultar en una mezcla biogénica (original) y diagénica.

Para detectar, no sólo por vista macroscópica, si un hueso o un diente fue afectado por procesos diagénicos, se pueden aplicar análisis roentgenográficos para revisar el tamaño de los cristallitos, que aumenta proporcional a la intensidad de la transformación diagénica (Tuross *et al.*, 1989). Una opción más sería un control químico, analizando las relaciones P/Ca o Sr/Ca, las cuales deben ser iguales o parecidas a materiales comparativos recientes no alterados (Tuross *et al.*, 1989). Un proceso más de alteración secundaria en huesos, y menos frecuente en esmaltes, es la biopurificación, donde conforme al aumento del nivel trófico se observan cambios en las relaciones elementales de Sr/Ca y Ba/Ca, lo cual puede enriquecer Sr y Ba en materiales óseos de entierros, resultando también en cambios de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Elias *et al.*, 1982). Finalmente, los fertilizantes modernos también pueden contribuir con estroncio externo a los huesos y dientes humanos. Con un valor de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ alrededor de 0.715 (Böhlke y Horan, 2000), los fertilizantes disueltos en agua pueden modificar la isotopía de restos humanos hasta 10%, lo cual difícilmente se puede corregir.

En general y debido a su densidad más alta, la estructura cristalina más densa y su reducido contenido de material orgánico, los esmaltes de los dientes no se ven tan afectados por los procesos diagénicos y de biopurificación mencionados anteriormente. Sin embargo, no se pueden excluir completamente (Hoppe *et al.*, 2003) y, adicionalmente, enfermedades dentales como caries, fluorosis (figura 3) o hipoplasia se han reportado también en comunidades maya y distintas culturas más (Cucina y Tiesler, 2003; Tiesler y Cucina, 2005). Estas enfermedades causan daños en la superficie del esmalte y permiten la entrada de estroncio externo pre o *post mortem* (Cucina y Tiesler, 2003).



Esmalte: hidroxiapatito, cristales de PO_4 relativamente grandes ($> 1\mu\text{m}$), estructura compacta, poco espacio poroso, duro, $\text{Ca}_{4.5}[(\text{PO}_4)_{2.7}(\text{HPO}_4)_{0.2}(\text{CO}_3)_{0.3}](\text{OH})_{0.5}$

Fémur: hidroxiapatito, poros grandes, cristales de PO_4 mas pequeños, menos duro. $\text{Ca}_9(\text{PO}_4)_{4.5}(\text{CO}_3)_{1.5}(\text{OH})$

Fig. 2 Diferentes características químicas y físicas de esmaltes y huesos humanos. Composición de Gerardo Arrieta.

Un punto importante es la preparación del esmalte para los análisis isotópicos. La dentina en el interior del diente se comporta igual que como material óseo, sensible a alteraciones diagenéticas y de biopurificación. Por estas razones, la separación completa del esmalte de la dentina con equipos dentales (figura 4) es un proceso esencial durante la preparación mecánica de las muestras, para garantizar que se está analizando sólo el material biogénico del esmalte y no una mezcla dentina-esmalte.

Técnica de pretratamiento de muestras óseas

Por más de cuatro décadas, la comunidad científica que trabaja con la isotopía de Sr y distintos elementos en restos humanos, ha intentado eliminar o disminuir la

alteración de las firmas isotópicas por los fenómenos descritos en el inciso anterior. Sin embargo, hasta hoy, casi todos los tratamientos se enfocaron a la eliminación de los contaminantes diagenéticos en huesos. Los primeros intentos incluyeron lavadas con detergentes y ácido acético por dos días (Sullivan y Krueger, 1981). Poco después, Sillen (1986) propuso su método de Solubility Profiling, que incluye un primer lavado en acetona y un subsiguiente tratamiento con un buffer de acetato repetido 24 veces en un baño ultrasónico. En el mismo año, Nelson *et al.* (1986) experimentaron con un protocolo que consiste de una primera calcinación de las muestras por 24 horas, seguido por un lixiviado con una mezcla de ácido acético y agua y, finalmente, la medición por separado de los lixiviados y de los residuos. Como se puede notar más adelante, este protocolo presenta similitudes con la técnica



Fig. 3 Enfermedades dentales: *a*) caries en un molar del entierro 31700 de Teopancazco; *b*) fluorosis: exceso de consumo de fluoruros (> 0.5 ppm). Fotos tomadas de Teodoro Hernández.

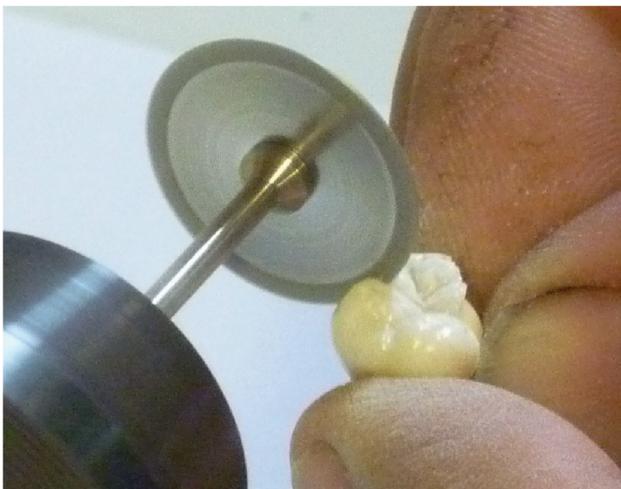


Fig. 4 Extracción del esmalte de un diente por medio de un taladro dental con disco de diamante. Fotos tomadas de Teodoro Hernández.

de lixiviado desarrollado en el Lugis. Sin embargo, la calcinación propuesta por Nelson *et al.* (1986) puede producir artefactos que resultan en diferentes perfiles de solución de los apatitos, lo cual puede resultar en firmas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ erróneas (Sillen y Sealy, 1995). Una excelente compilación de los múltiples métodos para el pretratamiento de muestras óseas lo publicó recientemente Wathen *et al.* (2022).

Técnica de pretratamiento de muestras de esmalte desarrollado en el Lugis

Los diferentes técnicas y protocolos para eliminar la contaminación diagenética en huesos humanos nunca han resultado en una eliminación completa de las entradas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ externo a las muestras. Por estas razones, a partir de los años 2000, varios autores consideraron obsoleto los análisis isotópicos de Sr en material óseo y sugirieron un enfoque al análisis de esmalte para estudios de migración (Lee-Thorp, 2008).

Sin embargo, y como se señaló anteriormente, los esmaltes de dientes también pueden ser afectados por procesos diagenéticos, en especial en combinación con la destrucción de la superficie del esmalte causada por enfermedades dentales. Para los estudios de migración humana usando isótopos de Sr en el Lugis, se siguió con el análisis paralelo de huesos y esmaltes. Se desarrolló un protocolo para la limpieza del material y para el lixiviado de los esmaltes. Sería deseable contar al inicio con 60-100 mg de huesos y esmaltes. El primer proceso incluye una pre-limpieza de las muestras sólidas con agua oxigenada (H_2O_2) y agua destilada, seguido por limpiezas adicionales con 1.5N HNO_3 , H_2O y etanol. Los fragmentos se pulverizan en un mortero de ágata a un tamaño de grano de $\sim 50 \mu\text{m}$. El polvo se limpia otra vez con H_2O_2 y H_2O , seguido por procesos de intercambio iónico por 24 horas con 1N cloruro de amonio (NH_4Cl). En este momento está listo el material de los huesos para su digestión con ácido nítrico (HNO_3) y para su análisis isotópico con el espectrómetro de masas con fuente iónica térmica (TIMS, por sus siglas en inglés), mientras que el polvo de los esmaltes pasa por un proceso de lixiviado en tres pasos.

El primer lixiviado incluye un tratamiento con ácido acético diluido (0.1N) por 15 minutos. La solución se decanta y se seca. Esto constituye el *primer lixiviado* de los esmaltes. El residuo también se seca y se lixivia por 12 horas con ácido acético más concentrado (1N). También se decanta esta solución y se seca, constituyendo el *segundo lixiviado*. Se queda luego el residuo del último proceso formando el *residuo 3* del esmalte. Los tres pasos del lixiviado se digieren en HNO_3 .

Para la determinación de la concentración de Sr en los huesos y esmaltes por el método de la dilución isotópica (Faure, 1986), se está añadiendo un trazador

(*spike*) de ^{84}Sr . Casi todos los tratamientos químicos son acelerados con el uso de un baño ultrasónico. Antes de la medición de la isotopía de Sr con el TIMS, se incluye una purificación del estroncio de las muestras mediante columnas de intercambio iónico (cromatografía de iones) para eliminar efectos isobáricos. Todo el tratamiento descrito en líneas previas se presentó con más detalle en Schaaf *et al.* (2002) y en Solís *et al.* (2017), incluyendo diagramas de flujo.

Recientemente se están analizando las relaciones isotópicas de Sr, en esmaltes también, con equipos Laser Ablation Multi Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (LA-MC-ICPMS), lo cual presenta la ventaja de la medición *in situ* sin procesos analíticos químicos en las muestras (Chávez, 2022). Se hicieron, por ejemplo, análisis en dientes grandes de cebús para detectar posibles movimientos durante el tiempo de vida de estos animales. Sin embargo, no se pueden eliminar alteraciones diagenéticas, o de enfermedades dentales, porque esta técnica no es apta para el lixiviado.

Ejemplos de muestras de Teopancazco, tratados con el proceso de lixiviado del Lugis.

A continuación, se presentan resultados isotópicos de dos individuos de entierros en Teopancazco del proyecto de la Dra. Linda Manzanilla, "Teotihuacan. Élite y gobierno. Excavaciones en Xalla y Teopancazco", financiado por la UNAM y el Conahcyt (proyectos 25563H, G36050H). Se analizaron esmalte y astrágalo de un hombre de aproximadamente 20-25 años del entierro 5, y esmalte y fémur de una persona más, probablemente masculino de 25-30 años, del entierro 8. Los números del laboratorio de la Dra. Manzanilla son 20271 y 31370, respectivamente. Se hicieron lixiviados con los esmaltes de estos individuos. Adicionalmente, se procesó un duplicado de los lixiviados del individuo 31370 para determinar la reproducibilidad del laboratorio. Los resultados se presentan en la figura 5, cuadro 1 y la figura 6, gráfica 1. El valor $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se publica con seis dígitos y los errores (desviación estándar $\pm 1\sigma$) se ve con sus últimos dígitos (v. gr. 0.705302 ± 0.000036 ; en la figura 5, cuadro 1 el error se ve con un valor de 36). La precisión para $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ medido con un TIMS debe ser mantenida menor a 40 partes por millón.

En la figura 5, cuadro 1 y en el histograma de la figura 6 se puede observar que los tres lixiviados del individuo 20271 son diferentes y el valor del residuo corresponde muy probablemente al área donde esta persona nació. El $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del esmalte fue obviamente afectado por alteraciones secundarias. De no haberse realizado el lixiviado en tres pasos, hubiéramos

Muestra	Entierro	Material	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 1\sigma$	tratamiento	Migrante?	Sr (ppm)
20271 Di Lix1	5	esmalte	0.705302	36	lixiviado 1	si	163
20271 Di Lix2	5	esmalte	0.705902	38	lixiviado 3		75
20271 Di Res3	5	esmalte	0.706682	41	residuo 3		56.1
20271 A	5	astrágalo	0.704769	34			500
31370 Di Lix1	8	esmalte	0.704732	29	lixiviado 1	no	383
31370 Di Lix2	8	esmalte	0.704733	28	lixiviado 2		242
31370 Di Res3	8	esmalte	0.704748	40	residuo 3		264
31370Di II Lix1	8	esmalte	0.704752	37	lixiviado 1		354
31370Di II Lix2	8	esmalte	0.704777	34	lixiviado 2		252
31370Di II Res3	8	esmalte	0.704750	36	residuo 3		315
31370 F	8	fémur	0.704742	31			552

Fig. 5, cuadro 1 Tabla de relaciones isotópicas y concentraciones de Sr de esmaltes con sus lixiviados (en gris) y huesos de los individuos 20271 y 31370 de Teopancazco. Para el individuo 31370 se hizo un duplicado del lixiviado (31370 II). La desviación estándar ($\pm 1\sigma$) se presenta con sus últimos dos dígitos. Fuente: elaboración de los autores.



Fig. 6, gráfica 1 Histograma con los datos isotópicos de estroncio de esmaltes y huesos de los individuos 20271 y 31370 de Teopancazco obtenidos en el Lugis. En azul se muestran los valores de dos lixiviados y del residuo; en rojo los valores de los huesos. La línea horizontal corresponde al valor promedio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70435$) para los suelos de Teotihuacan. Los esmaltes del individuo 20271 lo caracterizan como migrante, mientras que el individuo 31370 es local. Sus esmaltes se analizaron por duplicado. Los datos analíticos se presentan en la figura 5. Fuente: elaboración de los autores.

obtenido un resultado promedio (~ 0.70596) que no corresponde a la juventud del individuo. La firma isotópica del hueso (0.70477) es un valor parecido para suelos y rocas de la parte central de la Faja Neovolcánica Mexicana, por ejemplo, del volcán Popocatepetl (0.70439 ; Schaaf *et al.*, 2005) o de Teotihuacan (0.70435 , datos del Lugis).

En general, los valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de los huesos son ligeramente más altos que los de las rocas y suelos correspondientes, probablemente debido a los efectos de la biopurificación y la diagénesis. De cualquier forma, el $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del residuo del esmalte del individuo 20271 es más alto que los valores de la Faja Neovolcánica Mexicana y de Teotihuacan, lo cual lo caracteriza como migrante. El siguiente paso sería buscar, en la base de datos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para rocas y suelos en México y Centroamérica, valores que corresponden al esmalte para definir la región de procedencia (por ejemplo, GeoRef, 1996).

Considerando los resultados del individuo 31370, se pueden enfatizar los siguientes puntos: 1) el $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del hueso es muy parecido al valor del individuo 20271 y típico para Teotihuacan; 2) las relaciones isotópicas para los tres lixiviados del esmalte son todas idénticas dentro de la desviación estándar, evidenciando que los dientes de esta persona no se alteraron por Sr secundario; 3) la firma isotópica del esmalte es exactamente igual que la del hueso; esta persona muy probablemente ha vivido toda su vida en la región de Teotihuacan, y 4) el duplicado del lixiviado resultó en exactamente los mismos valores para $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, confirmando una excelente reproducibilidad del laboratorio.

Una compilación más amplia de los resultados del lixiviado en esmaltes de distintos individuos de Teopancazco fue publicada por Solís Pichardo *et al.* (2017).

Conclusiones

Desde el inicio de nuestra colaboración con la Dra. Manzanilla hemos analizado más de 100 dientes humanos y 50 de vertebrados (mamuts, caballos, camellos; Pérez *et al.*, 2016; Marín *et al.*, 2021) de acuerdo con el protocolo de lixiviado en el Lugis. En aproximadamente 50% de los casos hemos observado diferencias en la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en los tres pasos de lixiviado. Durante la extracción del esmalte de la dentina hemos observado macroscópicamente, en algo de 10% de los dientes, rasgos de caries, fluorosis o hipoplasia. Sin embargo, estroncio externo también puede entrar por microfisuras o por difusión al esmalte, lo cual no es visible macroscópicamente ni en un microscopio binocular. Esmaltes de personas identificadas como locales,

frecuentemente no muestran cambios en la firma isotópica de estroncio. Las contribuciones de Sr externo por diagénesis no afectan el $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de los dientes, porque el suelo y las plantas alrededor del entierro llevan valores idénticos o parecidas. Por otro lado, en el caso de migrantes que llegaron con un $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diferente al valor de su entierro, las inmediaciones la sepultura pueden afectar la composición isotópica del esmalte, lo cual se puede observar también en cambios de la firma isotópica durante el lixiviado.

Las fuentes de estroncio secundario en esmaltes no son fácilmente detectables y probablemente vienen de procesos de alteración aún no conocidos. Los resultados de nuestras investigaciones demuestran que el $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del esmalte sin lixiviado puede mostrar valores biogénicos correctos, pero también existe la probabilidad que el $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en esmaltes sin lixiviado representa una mezcla de estroncio original y de contaminaciones. En este caso, no se puede determinar el origen de la persona que se identificó como migrante. Por estas razones, recomendamos siempre la aplicación del protocolo de lixiviado para todos los análisis isotópicos de estroncio en dientes humanos y también en dientes de fósiles.

Para el caso de Teopancazco, con las técnicas descritas en este artículo se pudieron identificar individuos locales, aquellos que fueron migrantes lejanos o del corredor hacia Veracruz, y migrantes inversos (es decir, teotihuacanos que vivieron muchos años fuera de la Cuenca de México y regresaron a la metrópolis, donde fallecieron).

Agradecimientos

Gracias a Juan Carlos Mendoza González por su ayuda con las figuras. Todo el trabajo analítico descrito en esta contribución no hubiera sido posible sin las sugerencias y ayudas de nuestro colega y coautor Peter Horn (Universidad de Múnich), que lamentablemente falleció hace 5 años. Los comentarios de dos árbitros contribuyeron a mejorar sustancialmente el manuscrito original.

Bibliografía

Arnold, J.R. y Libby, W.F.

1951 Radiocarbon Dates. *Science*, 113: 111-120.

Barrera Huerta, A.

2014 *Isotopía de estroncio aplicado a material óseo humano localizado en ofrendas del Templo Mayor de Tenochtitlan* (Tesis de Licenciatura en Arqueología). ENAH-INAH, México, 235 pp.

- Bataille, C.P., Crowley, B.E., Wooller, M.J. y Bowen, G.J.**
2020 Advances in Global Available Strontium Isoscapes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 555: 109849.
- Bentley, R.A.**
2006 Strontium Isotopes from the Earth to the Archaeological Skeleton: A Review. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 13: 135-187.
- Böhlke, J.K. y Horan, M.**
2000 Strontium Isotope Geochemistry of Groundwaters and Streams Affected by Agriculture, Locust Grove, MD. *Applied Geochemistry*, 15 (5): 599-609.
- Chávez Ambriz, J.C.**
2022 *Análisis LA-MC-ICP-MS de la proporción $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en esmalte dental, aplicación a fósiles de Gonfoterios* (tesis de maestría). Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México, 198 pp.
- Cucina, A. y Tiesler, V.**
2003 Dental Caries and Antemortem Tooth Loss in the Northern Peten Area, Mexico: A Biocultural Perspective on Social Status Differences among the Classic Maya. *American Journal of Physical Anthropology*, 122: 1-10.
- Elias, R.W., Hirao, Y. y Patterson, C.C.**
1982 The Circumvention of the Natural Biopurification of Calcium along Nutrient Pathways by Atmospheric Inputs of Industrial Lead. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46 (12): 2561-2580.
- Ericson, J.E.**
1985 Strontium Isotope Characterization in the Study of Prehistoric Human Ecology. *Journal of Human Evolution*, 14 (5): 503-514.
- Faure, G.**
1986 *Isotope Geology*. Nueva York, Wiley & Sons, 589 pp.
- GeoRef**
1996 McLean, EEUU: Geo Science World. Recuperado de: <<https://pubs.geoscienceworld.org/georef>>.
- Hahn, O. y Walling, E.**
1938 Über die Möglichkeit geologischer Alterbestimmungen rubidiumhaltiger Minerale und Gesteine. *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*: 236: 78-82.
- Heuser, H.**
1975 *Klinik der Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten*. Heidelberg, Alemania, Dr. Alfred Hüthig Verlag, 690 pp.
- Hoppe, K.A., Koch, P.L. y Furutani, T.T.**
2003 Assessing the Preservation of Biogenic Strontium in Fossil Bones and Tooth Enamel. *International Journal of Osteoarchaeology*, 13: 20-28.
- Horn, P., Hölzl, S. y Fehr, T.**
1997 Spurenelemente und Isotopenverhältnisse in fossilen Knochen und Zähnen. En G.A. Wagner y K.W. Beinbauer (eds.), *Homo heidelbergensis von Mauer. Das Auftreten des Menschen in Europa* (pp. 145-166). Heidelberg, Alemania, C. Winter Heidelberg.
- Krueger, H.W.**
1985 Sr isotopes and Sr/Ca in bone. Poster presented at the Biomineralisation Conference, Airlie House, Warrenton, Virginia, abril 14-17.
- Lee-Thorp, J.A.**
2008 On Isotopes and Old Bones. *Archaeometry*, 50, 925-950.
- Lailson Tinoco, B.**
2009 *Aplicación de la isotopía de estroncio (Sr) como trazador de migración humana en el Barrio Teotihuacano de Teopanaczo* (Tesis de Maestría en Ciencias). Posgrado en Ciencias de la Tierra-UNAM, México, 116 pp.
- Manzanilla, L.R. (ed.)**
2017 *Multiethnicity and Migration at Teopanaczo. Investigations of a Teotihuacan Neighborhood Center*. Gainesville, University Press of Florida.
- Manzanilla, L.R., Mejía, G., Jiménez, G., Schaaf, P., Lailson, B., Solís, G., Morales, P. y Cienfuegos, E.**
2012 Caracterización de la población multiétnica de Teopanaczo por isótopos estables, isótopos de estroncio y elementos traza. En L.R. Manzanilla (ed.), *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopanaczo en Teotihuacan* (pp. 449-465). México, Coordinación de Humanidades-Coordinación de la Investigación Científica-UNAM.
- Marín Leyva, A.M., Schaaf, P., Solís-Pichardo, G., Hernández Treviño, T., García-Zepeda, M.L., Ponce Saavedra, J., Arroyo Cabrales, J. y Alberdi, M.T.**
2021 Tracking Home Range and Mobility of Late Pleistocene Fossil Horses from West-Central Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 105: 102926.

- Nelson, B.K., DeNiro, M.J., Schoeninger, M.J. y DePaolo, D.J.**
1986 Effects of Diagenesis on Strontium, Carbon, Nitrogen and Oxygen Concentration and Isotopic Composition of Bone. *Geoquímica et Cosmochimica Acta*, 50, 1941-1949.
- Pérez Crespo, V.A., Schaaf, P., Solís-Pichardo, G., Arroyo Cabrales, J., Alva Valdivia, L.M. y Torres Hernández, J.M.**
2016 Strontium Isotopes and Mobility of a Colombian Mammoth (*Mammuthus Columbi*) Population, Laguna de las Cruces, San Luis Potosí, México. *Geological Magazine*, 153 (4): 743-749.
- Price, T.D., Manzanilla, L. y Middleton, W.D.**
2000 Immigration and the Ancient City of Teotihuacan in Mexico: A Study Using Strontium Isotope Ratios in Human Bone and Teeth. *Journal of Archaeological Science*, 27 (10): 903-913.
- Ruiz González, J.L.**
2021 *Pervivencia y cambio en Toniná, Chiapas. Nuevas evidencias óseas del sacrificio humano en el umbral del Posclásico maya* (Doctorado en Estudios Mesoamericanos). Programa de Maestría y Doctorado en Estudios Mesoamericanos, UNAM, México, 351 p.
- Sánchez Aldana-Libano, F.**
2020 *Evidencias arqueológicas de migración en Ixtumbú, Chiapas. Análisis de isótopos de estroncio* (tesis de maestría). Posgrado en Arqueología, ENAH-INAH, México, 75 pp.
- Schaaf, P., Siebe, C., Stimac, J. y Macías, J.L.**
2005 Geochemical Evidence for Mantle Origin and Crustal Processes in Volcanic Rocks from Popocatepetl and Surrounding Monogenetic Volcanoes, Central Mexico. *Journal of Petrology*, 46 (6): 1243-1282.
- Schaaf, P., Solís, G., Manzanilla, L.R., Hernández, T., Lailson, B. y Horn, P.**
2012 Isótopos de estroncio aplicados a estudios de migración humana en el centro de barrio de Teopancazco, Teotihuacan. En L.R. Manzanilla (ed.), *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en Teotihuacan* (pp. 425-448). México, Coordinación de Humanidades-Coordinación de la Investigación Científica-UNAM.
- Sillen, A.**
1986 Biogenic and Diagenetic Sr/Ca in Plio-Pleistocene Fossils of the Omo Shungura Formation. *Paleobiology*, 12 (3): 311-323.
- Sillen, A. y Sealy, J.**
1995 Diagenesis of strontium in fossil bone: a reconsideration of Nelson *et al.* (1986). *Journal of Archaeological Science*, 22 (2): 313-320.
- Solís-Pichardo, G., Schaaf, P., Hernández Treviño, T., Lailson, B., Manzanilla, L.R. y Horn, P.**
2017 Migrants in Teopancazco: Evidence from Strontium Isotopic Studies. En L.R. Manzanilla (ed.), *Multiethnicity and Migration at Teopancazco. Investigations of a Teotihuacan Neighborhood Center* (pp. 143-163). Gainesville, University Press of Florida.
- Sullivan, C. y Krueger, H.**
1981 Carbon Isotope Analysis of Separate Chemical Phases in Modern and Fossil Bone. *Nature*, 292: 333-335.
- Tiesler, V. y Cucina, A.**
2005 Las enfermedades de la aristocracia maya en el Clásico. *Arqueología Mexicana*, 74: 42-47.
- Tuross, N., Behrensmeyer, A.K., y Eanes, E.D.**
1989 Strontium Increases and Crystallinity Changes in Taphonomic and Archaeological Bone. *Journal of Archaeological Science*, 16 (6): 661-672.
- Wathen, C.A., Isaksson, S. y Lidén, K.**
2022 On the Road Again—A Review of Pretreatment Methods for the Decontamination of Skeletal Materials for Strontium Isotopic and Concentration Analysis. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 14 (45). DOI s1250-022-01517-2.