



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Filosofía y Letras
Instituto de Investigaciones Filológicas
Posgrado en Estudios Mesoamericanos

HISTORIA DE LOS ELEMENTOS TRAZA COMO
MARCADORES DE PALEODIETA EN ARQUEOLOGÍA

T E S I S

QUE PRESENTA:

ENRIQUE VILLAMAR BECERRIL

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN ESTUDIOS MESOAMERICANOS

DIRECTORA DE TESIS: DRA. ANN CYPHERS TOMIC

Ciudad Universitaria

México, D.F. 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Para mi familia,
reiterándole mi cariño y gratitud

AGRADECIMIENTOS

La sólo idea de ingresar a un programa de posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México significó tanto una ilusión como un gran aliciente personal y profesional. Más aún cuando fui aceptado en la Maestría en Estudios Mesoamericanos, a la cual llegué con muchas expectativas motivadas sin duda por su planta de profesores, todos distinguidos especialistas de las ciencias sociales. Antropólogo físico de formación, quise ampliar y complementar mi perspectiva sobre las sociedades prehispánicas. Así, convertido en un universitario, me sentí afortunado de recibir cátedra impartida por mis profesores, quienes con paciencia y generosidad me ofrecieron sus conocimientos al guiarme en la sistematización de un universo fascinante de literatura relacionada con diversos aspectos del México antiguo. Agradezco a los Doctores y Doctoras Beatriz de la Fuente, Martha Ília Nájera, Ana Luisa Izquierdo, Miguel León-Portilla, Jaime Litvak, Johannes Neurath, Leopoldo Valiñas, por el tiempo, paciencia y conocimiento que me brindaron. Mi tránsito por el posgrado fue posible gracias a la beca que generosamente me concedió la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP).

Pero a la Maestría no llegué sólo, o para decirlo tal como fue, no sólo por iniciativa propia, pues casi casi me “empujaron”. El impulso provino de la dinámica misma del grupo de trabajo al cual orgullosamente pertenezco: el Proyecto Arqueológico San Lorenzo Tenochtitlán, cuya titular, la entrañable Dra. Ann Cyphers, es en buena medida “culpable” de muchas cosas extraordinarias ocurridas a todo el grupo. En lo que a mi toca, tiene muchísima culpa en mi tránsito profesional como antropólogo físico. Su disciplina, capacidad y rigor académico los combina alegremente con un sensacional don de gentes. Ha sido un honor, y seguirá siéndolo, colaborar con ese esfuerzo colectivo en torno a los olmecas. Por ello asumo y reitero mi condición de “hijo”. Ann, sabes bien cuánto te aprecio y te estoy agradecido, no está de más reiterarlo en éste trabajo de tesis, que en honor a la verdad pensé jamás terminaría.

Aprovecho para agradecer también a mis compañeros del PASLT de cuya camaradería y amistad he disfrutado siempre: Judith, Mari, Elvia, Lilia, Elisabeth y su casi tocaya Elisabeth, Nadia, Laura, Alejandro, Rodolfo, Felipe y Roger. Les agradezco además

su invaluable ayuda para la elaboración de éste trabajo, pues aunque no lo crean todos hicieron importante contribución, sea mediante el ejemplo que me brindaron, con su apoyo y confianza. A Felipe Ramírez le agradezco sobremanera su apoyo incondicional como Secretario Académico del posgrado en Estudios Mesoamericanos, de igual modo a la Dra. Ana Luisa Izquierdo, coordinadora del posgrado. Ambos han contribuido a que sea más fácil la tramitación de titulación y, una vez concluido el proceso, que sea ya una realidad el siguiente paso.

Me considero afortunado de haber tenido un excelente grupo de sinodales, quienes al igual que Ann me hicieron comentarios muy pertinentes que de otro modo hubiera pasado por alto. Todos son profesionistas sumamente calificados, admirables, y de una inquebrantable disciplina. Su ejemplo significó motivación extra para poner aún más empeño y cuidado en la elaboración de la tesis. Agradezco a los Doctores Judith Zurita, Andrés del Ángel, Stacey Symonds y Marci Lane Rodríguez que hayan compartido sus conocimientos, tiempo, y paciencia. Sus comentarios me dieron la pauta para proseguir con rumbo fijo, mejorando con mucho el trabajo.

En el Instituto de Investigaciones Antropológicas he conocido ha muchas personas. Una de ellas, de carácter inquieto e ingenioso, es Lupita Escobar Rodríguez, a quien agradezco su amistad y confianza.

Por último pero más importante, quiero reiterar mi agradecimiento a mi familia. Ella estuvo, está y estará siempre conmigo. Su presencia, confianza, cariño y apoyo a toda prueba es invaluable.

ÍNDICE

Agradecimientos	ii
Introducción	1
Capítulo I Los Inicios	9
Elementos traza, definición y propiedades	9
Relación con el tejido óseo	14
Paleodieta por análisis de elementos traza, los inicios	15
Enfoque multielementos	24
Capítulo II Variabilidad Biológica de Elementos Traza	27
Inter individuo (edad y sexo).....	27
Intra-individuo	30
Variabilidad en el reino vegetal	33
Variabilidad en ecosistemas modernos.....	37
Capítulo III Diagénesis del Tejido Óseo	41
Reconociendo el problema	42
Mecanismos de diagénesis.....	50
Contrarrestando los efectos.....	53
Capítulo IV Dieta y Recursos Acuáticos	62
Uso del estroncio y/o la relación Sr/Ca	62
El bario y la relación Ba/Sr.....	67
Capítulo V Estudios en Sociedades Mesoamericanas	86
MAYAS	86
Lamanai, Belice	86
Dzibanché y Kohunlich, Quintana Roo	93
TEOTIHUACÁN	96
MONTE ALBÁN	99
Capítulo VI Consideraciones Finales	105
Bibliografía	116

INTRODUCCIÓN

Todos los seres vivos requieren obtener del entorno medio ambiental componentes químicos (nutrientes) necesarios para su subsistencia, crecimiento y desarrollo. Los nutrientes forman parte intrínseca de los recursos (animales, vegetales, agua) consumidos por el organismo. Cada uno de esos recursos constituye un alimento, y la totalidad de estos representa, a su vez, la dieta del organismo.

Aunque a primera vista la dieta puede parecer sinónimo de alimentación, no es así, pues mientras que la primera refiere a la gama de los recursos elegidos para consumo (el menú), la segunda implica el proceso bioquímico de digestión de la dieta, mediante el cual los nutrientes son asimilados y transportados hacia todas las células del cuerpo. Entre 45 a 50 nutrientes, divididos en seis categorías (carbohidratos, grasas, proteínas, vitaminas, minerales y agua), son esenciales para el adecuado funcionamiento metabólico humano. El carácter esencial radica en el hecho de que necesariamente deben obtenerse de la dieta, por que el cuerpo carece de los medios bioquímicos para sintetizarlos o, en su defecto, para hacerlo en cantidades suficientes.

Pero más allá de consideraciones fisiológicas, el aprovechamiento del medio ambiente por parte de los seres humanos, sea por la apropiación (caza, pesca, recolección) y/o producción de alimentos, es un fenómeno social de connotaciones y condicionantes histórico-culturales. Ello se observa, por un lado, en la sola selección del menú, es decir, en asignarle valor de “alimento” a un determinado conjunto de toda la gama de recursos disponibles en el hábitat donde la sociedad despliega sus actividades, y por el otro lado

también en las distintas formas de organización establecidas por los individuos para procurarse de manera sistemática y constante la totalidad de alimentos. El espectro de las relaciones sociales involucradas cubre la producción, acopio, transporte, distribución, almacenamiento, preparación y consumo de los alimentos. En un sentido más amplio, éstas relaciones, que ocurren al interior y entre unidades domésticas, tienen incidencia directa en el despliegue espacial que sobre un área geográfica concreta establece la sociedad durante un momento histórico determinado, es decir, en su patrón de asentamiento. En concordancia a lo anterior, la dieta no es una entidad fija a través del tiempo. Varias razones pueden modificar, en distinto grado, su repertorio, sea por que el grupo social migra y ocupa otros ecosistemas; por innovaciones tecnológicas y/o contacto con otros grupos que le den acceso a nuevos alimentos.

El intrincado vínculo entre lo que los individuos consumen y la sociedad a la cual pertenecen se traslada también al ámbito del pensamiento religioso, ejemplo elocuente es el caso de Mesoamérica. En un mundo concebido por la integración de las distintas esferas de la realidad (la celeste, la terrestre y la del inframundo), gobernadas a su vez por múltiples deidades y fuerzas sobrenaturales, transcurrió la vida cotidiana de quienes conformaron las sociedades mesoamericanas.

Bajo éste esquema, lejos de ser meros testigos mudos de la volátil voluntad de las deidades, guiados por su naturaleza histórica los individuos desempeñaron un papel activo en el devenir de los acontecimientos, propiciando para sí y su colectividad, a través del rito, los pródigos bienes que caracterizaban a la acción benevolente de los dioses. Conscientes de su capacidad de incidir y de la indisoluble interdependencia que sin remedio les vinculaba a las deidades creadoras del cosmos y de la humanidad, los individuos

correspondían siendo cuidadosos de cumplir en tiempo y forma con los diversos rituales que daban sentido a su diario quehacer. Actitud observada en todos los niveles sociales, desde la gente común hasta la clase dirigente, como resulta de los testimonios que Fray Bernardino de Sahagún (1989) y Fray Diego de Landa (1982) tuvieron a bien registrar de sus informantes indígenas, ancianos de la nobleza educados de acuerdo a la antigua tradición.

Los pueblos mesoamericanos concibieron a sus dioses bajo una fisonomía antropomorfa y copartícipes de las virtudes, debilidades y defectos característicos de la condición humana. Lejos de gobernarse por acciones siempre inequívocas y de ver en todo momento a favor de los seres humanos, el proceder de las deidades era ambivalente y caprichoso. Esto explica que les haya tomado cuatro intentos previos antes de dar existencia a los seres humanos, susceptibles de cumplir a cabalidad con las únicas dos exigencias formuladas por los dioses: alimento y culto, en retribución por haberles dado vida, subsistencia y un amplio espacio para habitar. Fue ese el vínculo y compromiso que rigió la relación entre dioses y humanos.

El carácter voluble de las deidades significó motivo de constante preocupación por parte de los individuos, quienes buscaron a toda costa encausar las acciones divinas a fin de que operaran en beneficio de la colectividad. Sin embargo, a veces ocurrían sequías, inundaciones, escasez de alimentos, enfermedades, derrotas bélicas, todos ellos nocivos fenómenos naturales y sociales explicados como manifestación material del disgusto de una o varias deidades, a causa de que la sociedad incumpliera de manera parcial con su compromiso. Bajo esas circunstancias era preciso apaciguar el enojo evitando mayor daño a la comunidad. En respuesta la sociedad proporcionaba más ofrendas, sacrificios humanos, y

aseguraba mayor escrúpulo en la práctica ritual. Por si mismo, semejante esfuerzo social, sin duda notable y a veces desesperado, no garantizaba alcanzar el objetivo deseado, pues los dioses podían seguir dando muestras de malestar.

Aunque esa inequitativa relación solía transcurrir por momentos de aguda inestabilidad y zozobra, de igual modo atravesó por muchos otros de enorme dicha para los individuos, quienes se sintieron entonces agradecidos por los dones con los que les habían honrado los dioses. Motivos de regocijo nunca faltaron, ni eran pocos ni mucho menos esporádicos, la amplia gama comprendía desde una buena cosecha en la parcela, el nacimiento de un hijo, hasta el éxito individual en el campo de batalla o el regreso con bien de una fructífera empresa comercial. Sin excepción alguna, en los casos antes mencionados, la gente creía que había sido la conjunción tanto del trabajo como de la diligente y cuidadosa actividad ritual de los individuos, la que propició se inclinara a su favor la influencia ejercida por los dioses sobre el devenir de los acontecimientos. A lo anterior obedece que los padres procuraran con insistencia en sus hijos el sentido de responsabilidad hacia sus obligaciones, pues de ser holgazanes y negligentes tendrían seguro un desafortunado porvenir.

Si bien líneas arriba se comentó sobre las dos exigencias hechas por parte de los dioses a los humanos, ¿estos últimos qué solicitaban de los primeros?, es decir, ¿qué fin perseguía la religión? En un notable ejercicio de síntesis y sin recurrir a juicio de valor alguno, como fue muy proclive a hacerlo a lo largo de su obra, fray Diego Durán responde de la siguiente manera: “...en todas las fiestas de su calendario, que eran 18, todo el fin de celebrarlas con tantas muertes de hombres, y con tantos ayunos y derramamientos de

sangre de sus personas, todo se dirigía sobre pedir de comer, años prósperos y conservación de la vida humana” (Durán 1984, I: 171).

Aunque el padre Durán hace mención explícita sólo de las festividades correspondientes al calendario ritual, las razones que motivaron a estas pueden sin mayor problema hacerse extensivas también al resto de las celebraciones, muchas de ellas de modesto alcance pero no por ello menos importantes: las relacionadas con el ciclo de vida de los individuos y de sus familias. En todas las festividades y celebraciones los alimentos ocuparon destacado papel en las ofrendas, constituyéndose por tanto en un vínculo con la esfera de lo sagrado, como en una manifestación tangible de la armónica simbiosis entre deidades y humanos.

La dieta es, en consecuencia, un patrimonio social y por ende un elemento de identidad entre los individuos. Debido su innegable relevancia antropológica, el estudio de la dieta antigua ha sido abordado también desde otros enfoques teórico-metodológicos, según sea el tipo de material arqueológico analizado: botánico, faunístico, humano.

Los entierros humanos constituyen contextos arqueológicos singulares, pues como ninguno otro aporta información ideológica del grupo social (características de la ofrenda asociada, ubicación del entierro dentro del sitio, por ejemplo), y biológica de los individuos. En lo que a esta última se refiere, el estudio de los restos humanos permite conocer, desde una perspectiva histórica, diversos fenómenos socioculturales. Ejemplo de lo anterior son las investigaciones relacionadas con la identificación de movimientos migratorios y eventual mestizaje de las poblaciones; o aquellas otras investigaciones interesadas en las características paleodemográficas y paleoepidemiológicas de los grupos humanos, como una aproximación del impacto de las condiciones sociales de existencia; o

ni que decir del estudio de las prácticas mortuorias, sus variantes cronológicas y espaciales; o el estudio de las características de la dieta antigua, sus condicionantes y variantes. Si bien de ningún modo los únicos, éstos cuatro grandes rubros de investigación resultan representativos del quehacer en antropología física. En cualquiera de los casos, tales estudios hallan sustento en las propiedades biológicas del tejido óseo: lejos de ser materia inerte una vez mineralizado, es en realidad un tejido dinámico en permanente renovación de su estructura y composición, mediante el accionar complementario de los procesos de deposición y remoción mineral realizado respectivamente por los osteoblastos y osteoclastos, las células del tejido. Gracias a semejante actividad conjunta, llamada remodelación ósea, en el tejido queda registro de la historia de vida del individuo.

Para el estudio de la dieta antigua, las perspectivas de análisis de los restos óseos humanos han sido macroscópicas (atrición dental, síntomas patológicos por deficiencias nutricionales), histológicas, y de la composición química. Como es obvio, cada una de dichas perspectivas requiere de cierto entrenamiento y especialización.

La vertiente química, incorporada al repertorio durante los años 70s del siglo pasado, inicia con el análisis del componente mineral del tejido óseo (elementos traza). Considerada en ese entonces como una alternativa directa y sencilla para estimar las características de la dieta antigua, eventualmente alcanzó un alto grado de sofisticación y complejidad teórico-metodológica.. La formación académica de los antropólogos les colocó en desventaja ante las exigencias del nuevo campo de investigación, donde se entrelazan fenómenos físicos, químicos, bioquímicos y geoquímicos, volviendo su acceso en buena medida restringido para la mayor parte de los antropólogos. Por lo tanto, al carecer de los elementos de juicio necesarios, producto del desconocimiento sobre el tema, se está en la incapacidad para

ponderar el sustento y aporte real de los estudios de paleodieta, así como de las interpretaciones a que dan pie respecto a la dinámica de las sociedades. El desconocimiento, además, trae aparejada consecuencias nefastas: se es proclive a ignorar o a considerar como válida la investigación y, de ser este último el caso, a considerarla como referente, es decir, como la forma “correcta” de hacer las cosas, obligándose uno a replicarla en su proceder, independientemente de que el estudio cumpliera o no con los procedimientos metodológicos indispensables. De ahí se entiende la necesidad e importancia de presentar en forma clara un balance pormenorizado y actualizado sobre la aplicación paleodietética de los estudios de elementos traza en restos óseos humanos, sobre sus premisas fundamentales, sus requerimientos metodológicos, sus líneas de investigación, sus limitantes, y finalmente, dada su relevancia para nuestro quehacer concreto, sobre su aplicación para inferir la dieta de las sociedades mesoamericanas. A tal propósito obedece la presente investigación de tesis. Para conseguirlo se lleva a cabo un análisis crítico de la literatura, incluyendo la relacionada con estudios de caso, guiada por los siguientes objetivos:

- 1) Identificar y describir los principios básicos que en su origen dieron sustento a la técnica de paleodieta por elementos traza.
- 2) Desarrollar en orden cronológico los diversos cuestionamientos a que se han visto sujetos los principios básicos, y discutir las implicaciones de ello para la técnica de paleodieta en su conjunto.
- 3) Discutir las distintas aplicaciones de la técnica en el ámbito de la antropología.

- 4) Hacer una revisión de las investigaciones de paleodieta por elementos traza realizadas en poblaciones mesoamericanas, para evaluar el comportamiento de la técnica en las circunstancias concretas de dicha área cultural.
- 5) Presentar un balance final sobre los requerimientos metodológicos de la técnica y de las posibilidades que ofrece para el estudio de la dieta antigua.

Para cumplir con los objetivos mencionados, la investigación de tesis presenta la siguiente estructura: en el Capítulo I se define por principio a los elementos traza, en tanto constituyentes de la materia orgánica, sus funciones metabólicas en el organismo y su relación con el tejido óseo. Esto último es fundamental, pues dicho tejido es el utilizado para los estudios de paleodieta. Con esos antecedentes, posteriormente se describen las circunstancias que dieron origen a los análisis de paleodieta por elementos traza y los primeros estudios aplicados en antropología. En los Capítulos II y III se discuten con detalle los procesos *ante* y *postmortem*, respectivamente, que subyacen a la variabilidad en el contenido óseo de elementos traza a nivel inter e intra individuo. Así mismo, con igual detalle se discute el impacto metodológico de esas fuentes de variabilidad para las investigaciones de paleodieta. El Capítulo IV desarrolla la aplicación del análisis de elementos traza para distinguir en poblaciones humanas la ingesta de recursos acuáticos. Hecho el balance anterior, en el Capítulo V se procede a revisar las investigaciones realizadas en grupos prehispánicos de Mesoamérica, haciendo particular énfasis, debido a su capital importancia, en los criterios metodológicos. Por último, el Capítulo VI presenta los comentarios finales, a modo de conclusión, sobre la pertinencia de aplicar la técnica de paleodieta por elementos traza, su metodología y las posibilidades que ofrece.

CAPÍTULO I

LOS INICIOS

El avance de la ciencia suele verse impulsado de manera particular por individuos cuya perspicacia e ingenio les permiten avizorar, para su campo, novedosas aplicaciones del conocimiento generado en otras disciplinas. El oportuno y valioso tránsito de esos individuos no puede dejar tras de sí mas que la huella indeleble propia de los pioneros, quienes mediante nuevas vías ofrecen respuestas a problemas concretos que por tiempo acapararon la inquietud del medio académico.

En el presente capítulo veremos de qué forma investigadores de la más diversa índole tejieron en conjunto el vínculo entre un tipo especial de elementos químicos del tejido óseo (elementos traza) y la dieta de los antiguos grupos humanos. El capítulo inicia con la definición de los elementos traza, su papel en el metabolismo de los organismos, para luego describir sobre qué bases la novedosa técnica de análisis químico se empleó como parámetro del consumo relativo de dos clases de recursos terrestres (plantas y carne), y con ello un medio para identificar al interior de los grupos humanos diferencias de estatus social.

Elementos traza, definición y propiedades

La materia orgánica consta principalmente de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), y azufre (S). El metabolismo de los mamíferos, clase a la que pertenece el ser humano, requiere también de sodio, magnesio, fósforo, cloro, potasio, y calcio, así

como de algunos otros elementos cuya presencia en los tejidos es muy baja. Las técnicas en principio empleadas para medir la concentración de éstos últimos, apenas pudieron detectarlos, de ahí que fueran bautizados como *elementos traza* (*trace elements*). Entre ellos se cuenta al arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cr), estroncio (Sr), flúor (F), manganeso (Mn), mercurio (Hg), molibdeno (Mo), plomo (Pb), vanadio (V), yodo (I), zinc (Zn). A manera de comparación, mientras el calcio se halla en el orden de 1.4% de la masa corporal de un sujeto masculino adulto, los elementos traza lo hacen abajo del 0.01%, el estroncio por ejemplo alcanza un 0.00044% (Nielsen, 2004: 584). Tan reducidos niveles obligan a reportarlos en partes por millón (ppm).

Todos los elementos químicos mencionados se localizan en el medio ambiente natural, e ingresan al organismo a través de la dieta y agua consumidas. Dado el mayor requerimiento fisiológico de los elementos principales, el metabolismo del mamífero requiere absorberlos de la dieta diaria en porcentajes específicos. A pesar de hallarse en el cuerpo, no todos los elementos traza cumplen una función en el mantenimiento estructural y fisiológico del organismo, es decir no todos son esenciales. Propiedad reconocida sólo a quince de ellos (arsénico, cobalto, cobre, cromo, flúor, hierro (Fe), litio (Li), manganeso, molibdeno, níquel (Ni), selenio (Se), silicio (Si), vanadio, yodo, y zinc) pues son parte de diversos complejos enzimáticos involucrados a su vez en el mantenimiento celular, o en el sistema inmunológico (Armstrong *et al.*, 1989: 240; Mertz, 1981: 1332, 1333). Cabe reconocer que el término *esencial* ha cambiado de significado a través del tiempo, en la medida que lo han hecho también los criterios para su definición, y por ende la lista de elementos traza así considerados no puede tomarse como definitiva (c.f. Mertz, 1981; Schroeder *et al.*, 1972: 511; Bogden, 2000: 3-4; Nielsen, 2000: 11-12). Existe sin embargo

el consenso mínimo de que un elemento es esencial cuando una dieta adecuada en todos sentidos excepto por una insuficiente ingesta del elemento bajo estudio, resulta consistentemente en un deterioro de la función fisiológica, y cuando la dieta es suplementada con niveles fisiológicos de ese elemento, pero no de otros, previene o alivia dicho deterioro fisiológico (Vishwanath, 2003: 85). Al cumplir tan importante papel, cualquier déficit en dichos elementos provocará trastornos metabólicos. Paradójicamente, más todavía para aquellos sin función específica, los elementos traza no resultan inocuos al organismo, pues en elevadas concentraciones, sin dejar el rango de ppm, se vuelven tóxicos e incluso mortales.

Con excepción del cobre, flúor y el zinc, el resto de los elementos traza no contribuyen al desarrollo ontogenético del tejido óseo, pero sin embargo es ahí donde en variable medida todos los elementos son depositados, sea en la fase orgánica y/o inorgánica.

Al ser esencial, el cobre es requerido por muchas enzimas incluyendo la lysyl oxidasa, que es responsable del proceso de entre-cruzamiento (*cross-linking*) del colágeno. Proceso por medio del cual se establecen enlaces químicos entre las múltiples fibrillas de colágeno, proporcionándole así consistencia y estabilidad a la fase orgánica del tejido óseo. Deficiencias en la ingesta de cobre provocan osteopenia y fracturas óseas (Abrams y Griffin, 2004: 377-378). El cobre se deposita principalmente en la fase orgánica del tejido.

El zinc forma parte de más de 200 enzimas. Diversos estudios sugieren que deficiencias en el consumo de zinc están asociadas a una bajo contenido mineral del tejido óseo, baja densidad, y puede ser causa de fracturas. Debido a que la deficiencia del elemento tiene además un probable efecto sobre la síntesis de proteínas, se cree es causa de

reducido crecimiento y maduración esquelética (Abrams y Griffin: 381-382; Salmenperä, 1997: 115-116). El zinc participa de distintas formas en el metabolismo óseo, pues interviene en la síntesis del Factor de Crecimiento (IGF-1), fundamental para el crecimiento del hueso; estimula la proliferación de osteoblastos, células del tejido encargadas de la síntesis de la matriz de colágeno y de su mineralización; regula la actividad de la hormona paratiroides, promotora, a su vez, de la acción de los osteoclastos, células responsables de la reabsorción ósea que vuelve accesibles para diversos procesos metabólicos los minerales alojados en el hueso (Bouglè *et al.*, 2004: 17).

La desintegración de los alimentos en formas asimilables, ocurrida en el tracto gastrointestinal, constituye el proceso de digestión, mediado por la actividad de enzimas. Los nutrientes consisten de grandes polímeros que deben ser reducidos a componentes más simples antes de que ellos puedan ser absorbidos y así hacerlos disponibles a todas las células del cuerpo. Los alimentos ingresan por la boca, donde son homogeneizados, mezclados y lubricados por la saliva. De la boca pasan vía el esófago hacia el estómago donde los alimentos entran en contacto con los jugos gástricos cuyo pH ácido es igual o menor a 2. El contenido del estómago se introduce intermitentemente en el duodeno del intestino delgado, que además recibe a las secreciones de la vesícula biliar y el páncreas. La bilis fluye desde el hígado hacia la vesícula biliar, donde es almacenada y de donde es vertida al duodeno. El pH alcalino de las secreciones pancreáticas y la bilis neutraliza la acidez del alimento proveniente del estómago, de modo que puedan actuar eficazmente las enzimas pancreáticas e intestinales. La mayor parte (90-95%) de la absorción de nutrientes de la dieta ocurre en el intestino delgado y no en el estómago, sin embargo es el páncreas el

principal órgano que sintetiza y secreta la mayor cantidad de enzimas necesarias para digerir a los alimentos (Vishwanath, 2003: 17-19).

La *biodisponibilidad* de un mineral o elemento traza es definida como la fracción del nutriente ingerido que es absorbida y subsecuentemente utilizada en funciones fisiológicas. Algunos nutrientes inorgánicos como por ejemplo el Ca, Mg, Cu, I y Se, son relativamente bien absorbidos, pues en el ser humano sus promedios van del 30% para el Ca a casi el 100% para el I. En estos casos entran en operación mecanismos homeostáticos, de manera que cuando la cantidad del elemento absorbido es mayor a los requerimientos inmediatos, el exceso es almacenado en el cuerpo o eliminado vía la orina y/o las heces. Elementos traza con menores tasas promedio de absorción incluyen al Zn (10-15%), el Fe (< 1-30%), el Mn y Cr ambos con < 5% (Fairweather-Tait y Hurrell, 1996: 298).

Son varios los órganos y procesos bioquímicos involucrados en la digestión gastrointestinal. Es obvio que deficiencias en cualquiera de las etapas incidirían de manera negativa en la biodisponibilidad de nutrientes, sin embargo también puede verse incrementada o disminuida por otro factor: las relaciones sinérgicas o antagónicas entre nutrientes y/o componentes de la dieta. Por ejemplo, los antagonistas del Zn incluyen al Ca, Cu, Fe, Cd y Cr. Por otro lado el Zn establece relaciones sinérgicas con el Mg (Sandford y Weaver, 2000: 333). En lo que a componentes se refiere, todos los alimentos de origen vegetal contienen fibra en variables porcentajes. Uno de los constituyentes de la fibra es el fitato, que impacta en la biodisponibilidad de nutrientes pues tiene como propiedad establecer enlaces químicos insolubles, interfiriendo así con la absorción intestinal de minerales y elementos traza, principalmente el zinc, aunque también del hierro, calcio y magnesio.

Relación con el tejido óseo

El sistema esquelético cumple en los vertebrados funciones tan variadas como importantes. Ofrece soporte mecánico a la estructura corporal; representa sitio de inserción para el sistema muscular, cuya actividad conjunta faculta el libre movimiento del vertebrado; protege órganos vitales; y funciona como reservorio de minerales.

El tejido óseo es lo que se denomina un *material compuesto*, ya que al constituirse por dos entidades y combinar estas sus respectivas propiedades, le aportan cualidades únicas no observadas en lo individual por ninguna de ambas entidades.

En el hueso seco adulto, 30% es materia orgánica, 70% inorgánica. En su mayoría de colágeno (90%), las proteínas que componen la fase orgánica sirven como sustrato donde se incrustan los diminutos cristales de hidroxiapatita, propia de la fase inorgánica. La integración de ambas fases otorga al hueso su característica rigidez y flexibilidad.

Al concentrarse la técnica de paleodietas por elementos traza en la fase inorgánica del tejido óseo, se hará énfasis en ella. La hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) es un mineral complejo en virtud de su inestabilidad química. Análisis muestran que su composición “real” no corresponde a la que en “teoría” indica su fórmula. En consecuencia, la apatita ósea tiene como una de sus propiedades ser no estequiométrica, nombre correcto para la discrepancia referida. Lo anterior no debe interpretarse como pifia teórica alguna, sino más bien en función del fenómeno químico subyacente, intercambio heteroiónico, a través del cual los iones calcio (Ca^{+2}), fosfato (PO_4^{-3}) e hidroxil (OH^{-1}) de la apatita son sustituidos por los de otros elementos presentes en el medio y aportados por la dieta. El bario (Ba^{+2}) estroncio (Sr^{+2}), plomo (Pb^{+2}) y sodio (Na^{+2}) pueden sustituir al ion calcio; el flúor (F^{-1}), y el cloro (Cl^{-1}) al del hidroxil; y el carbonato (CO_3^{-2}) al fosfato.

Dado que los intercambios mencionados ocurren bajo condiciones biológicas, éstos se desarrollan no de manera indiscriminada, sino de acuerdo a los límites impuestos por la fisiología, en cuanto a la disponibilidad de iones en el tejido y a la preferencia metabólica hacia otros (es imposible, por ejemplo, el reemplazo total de iones calcio por los de estroncio y/o plomo). Sin embargo, el fenómeno químico como tal no es privativo de la hidroxiapatita en el tejido vivo, pues también tiene lugar *postmortem*. En tal caso, liberado ya de las restricciones biológicas antes impuestas y ahora bajo nuevas circunstancias medioambientales, la etapa diagenética del fenómeno (desarrollada cuando el hueso es depositado en el subsuelo) seguirá diversos caminos, como diversos son los entornos físico-químicos del sustrato donde yacen los restos humanos, tema a tratar en el Capítulo III, Diagénesis del Tejido Óseo.

Volviendo a la etapa biológica del intercambio iónico, cabe señalar en él la participación de cuando menos cuatro elementos traza en dos roles distintos, el bario, estroncio y plomo sustituyendo al calcio, y el flúor al hidroxil. De los cuatro, sólo el flúor se clasifica como esencial. No obstante carecer de función reconocida, el bario, estroncio y plomo son capaces de ocupar en la hidroxiapatita el mismo sitio que el calcio, debido a que sus semejanzas químicas les permiten un comportamiento metabólico similar al del calcio.

Paleodieta por análisis de elementos traza, los inicios

A consecuencia de los ensayos nucleares efectuados sobre la superficie terrestre durante los años 1950's e inicios de los 1960's, fueron liberadas a la atmósfera importantes cantidades de isótopos radioactivos, entre ellos el estroncio 90 (^{90}Sr). El carácter nocivo de las partículas suscitó preocupación en los círculos médicos occidentales, ante el riesgo latente

de eventuales problemas de salud pública, pues a la capacidad del isótopo ^{90}Sr de comportarse como el calcio e incorporarse al tejido óseo, lo volvían peligroso su vida media de 25 años y el ser causante de cáncer (Comar *et al.*, 1957). Especialistas de la más diversa índole emprendieron investigaciones dirigidas a rastrear el tránsito de los isótopos, y del estroncio como elemento, desde que eran liberados, luego depositados en el suelo y en los cuerpos acuíferos, su posterior incorporación en las cadenas alimenticias, y su ulterior metabolismo por el cuerpo humano.

Una vez suscrito el tratado internacional que proscribe semejantes ensayos nucleares, cesaron paulatinamente la preocupación y las investigaciones médicas, quedando de sus resultados constancia en la literatura especializada. Así, se identificaron dos propiedades del comportamiento del estroncio: *a)* su distribución geográfica en la litosfera y entre los seres vivos (biosfera) es heterogénea. Dicho de otro modo, la concentración del elemento varía según las características geológicas del suelo y según las especies de organismos; *b)* en el caso de los vertebrados, el elemento se concentra principalmente en el esqueleto (Ezzo, 1994: 6-7; Price, 1989: 6-7; Schoeninger y Peebles, 1981: 392; Sillen y Kavanagh, 1982: 67-70; Sillen *et al.*, 1989: 508).

El estroncio, metal perteneciente al grupo de los alcalino térreos, muestra una heterogénea distribución en la litosfera. Junto a otros de su grupo, ingresa en la cadena alimenticia al ser absorbido, del suelo, por las plantas. Estos organismos, llamados también productores primarios, presentan equilibrio, en lo que toca al nivel de estroncio, respecto al suelo del cual se nutren. Es decir, entre el sustrato y el organismo la relación Sr/Ca es 1:1 (Comar *et al.*, 1957: 486).

Por su parte, el metabolismo de los vertebrados del siguiente nivel trófico de la cadena alimenticia, consumidores primarios, es capaz de distinguir los elementos que componen la dieta, y dado sus requerimientos favorece la absorción intestinal del calcio a la del estroncio. Así, el herbívoro retiene entre 40 a 80% del calcio y sólo el 20 a 40% del estroncio ingeridos. Rasgo característico de los mamíferos, el 99% del estroncio retenido metabólicamente es alojado en la fase mineral del esqueleto y el resto se distribuye en otros tejidos (Schroeder *et al.*, 1972: 492), así como en el flujo sanguíneo, donde circula incorporándose a procesos metabólicos en los que actúa como el calcio. Debido a la preferencia metabólica por éste último, la relación Sr/Ca en el hueso es siempre menor a 1, por tanto siempre menor al de la dieta vegetal.

Los consumidores secundarios, estadio superior de la cadena al cual pertenecen los carnívoros, también favorecen la absorción intestinal del calcio. Puesto que se alimentan del tejido blando de sus presas cuyo nivel de estroncio es mínimo, los carnívoros exhiben el más bajo nivel de estroncio óseo en cualquier ecosistema. Los omnívoros, como el ser humano, que ocupan un lugar intermedio en la cadena, poseen también valores intermedios de Sr/Ca.

Gracias a la descrita preferencia metabólica por el calcio (fenómeno referido en la literatura como “discriminación en contra del estroncio” o “biopurificación del calcio”), y al resultante valor de Sr/Ca en el hueso, pueden separarse por niveles tróficos a los vertebrados que habitaron en el *ecosistema de la misma región geográfica*. Es necesario recalcar esto último, pues la variable cantidad de alcalino térreos distribuida en la litosfera dificultaría cualquier intento de separar por niveles tróficos si se comparan especies de distinto origen geográfico, aun cuando provengan del mismo tipo de ecosistema, pues la

concentración de elementos en la litosfera de las regiones involucradas puede ser muy distinta (baja en unas y mayor en otras), lo que arrojaría valores de Sr/Ca discordantes: ejemplares de la misma especie de herbívoro, por ejemplo, tendrían valores más bajos o altos según sea el área geográfica de procedencia (ver Schoeninger, 1985).

A mediados del siglo pasado, las propiedades referidas (diferente distribución en la litosfera, su discriminación biológica y su depósito en el tejido óseo de los vertebrados) convertirían al estudio del estroncio en un campo fértil de investigación para áreas del conocimiento muy diferentes de aquellas de índole biomédico que en principio se preocuparon de él. Perspicaces cuanto más, Toots y Voorhies (1965) reconocieron el enorme potencial que brindaba a la paleontología, en particular para reconstruir las relaciones bióticas entre vertebrados que habitaron el mismo ecosistema. Para tal propósito los autores cuantificaron el contenido de estroncio de herbívoros fósiles y de carnívoros hallados en estratos del Plioceno Inferior de una cantera en Knox County, Nebraska, EUA.

El análisis químico de los herbívoros fue complementado con el registro de la morfología dentaria, adaptada en cada caso a la textura y consistencia del tipo de plantas que integraron la dieta habitual de los vertebrados. Este último método, y la comparación con el tipo de subsistencia de los descendientes contemporáneos de los especímenes fósiles, permitió identificar dos patrones en la morfología dentaria y, por añadidura, igual número de regímenes alimenticios en la muestra analizada: uno a base de pastos y otro de hojas. En conjunto, los resultados de la investigación mostraron clara asociación entre la dieta de pastos y los niveles más bajos de estroncio en los fósiles, mientras que el régimen de hojas lo estuvo con los niveles más elevados. Aunque habían coexistido, las especies animales estudiadas aprovecharon distintos recursos vegetales del medio ambiente, concluyeron los

autores. Por otro lado, al comparar entre herbívoros y carnívoros, las concentraciones de estroncio separaron a las especies por nivel trófico, siendo el tejido óseo de los carnívoros el que registró las más bajas estimaciones de estroncio.

Toots y Voorhies (1965) fueron cuidadosos en insistir que el éxito de la técnica de análisis químico era factible siempre y cuando la muestra esquelética reuniera dos condiciones: que los organismos hayan pertenecido a una misma comunidad biótica, y que el contenido óseo de Sr no haya sido sujeto a sustancial alteración *postmortem* o, en su defecto, que tales cambios afectaran de manera uniforme a la muestra en su conjunto. Los autores resumieron de la siguiente manera una de las premisas básicas de la técnica de análisis químico: “El contenido de estroncio en el hueso está en función del que contiene el alimento ingerido” (*op. cit.*: 854, traducción mía).

Transcurrió una década para que el análisis de estroncio en restos óseos fuera aplicado por primera ocasión al ámbito de la antropología. Brown (1973) estudió colecciones de diversa procedencia geográfica, cronológica y cultural: sitios del suroeste norteamericano, de Irán, y de Mesoamérica (Huitzo y Tierras Largas, en el estado de Oaxaca) fueron incluidos.

Las muestras mesoamericanas exhibieron consistentes variaciones en el nivel de estroncio, mismas que separaban a la población de cada sitio en dos grupos bien definidos. Este hecho fue interpretado por la autora como evidencia clara de que en cada sitio concurren de manera independiente dos tipos de dieta, una basada en recursos de origen vegetal (agrícola dada la naturaleza de las sociedades), reconocida por los niveles más altos de estroncio; y otra donde predominó la proteína animal, asociada a su vez con los niveles más bajos del elemento. Tanto en Huitzo como en Tierras Largas, los entierros femeninos

mostraron las concentraciones más elevadas. Brown atribuyó esa distribución por sexo a diferencias sociales subyacentes, que denotaban distinto consumo y acceso por parte de los sujetos a los recursos que la sociedad era capaz de proveerse.

El carácter agrícola de los sitios mesoamericanos estudiados hizo suponer a la autora que la producción de ese tipo de bienes era suficiente, siendo su consumo más accesible entre los individuos, no así el de los recursos de origen animal cuya distribución se esperaba fuera más restringida, adquiriendo estos por consiguiente distinto significado social. Dado que el análisis químico reveló a los individuos masculinos como los únicos miembros cuya dieta incluyó de forma regular mayores cantidades de carne, un recurso escaso, las diferencias de dietas se traducían en diferencias de estatus social.

Sin paralelo en el estudio de las sociedades pretéritas, el análisis de estroncio de los restos óseos humanos ponía, ya, al alcance de la mano, un medio *directo* para estimar las cantidades relativas del aporte cárnico/vegetal en la dieta antigua. Parecía superado el sesgo tafonómico que, traducido en una preservación diferencial de los restos orgánicos, permite a los métodos tradicionales e indirectos de estudio (arqueofaunísticos y paleobotánicos) una aproximación parcial e incompleta de la subsistencia en su conjunto. Demostrada su notable utilidad a través de la investigación de Brown, la técnica inauguraba un productivo vínculo con la arqueología y en ésta última una nueva línea de investigación: la paleodieta por análisis químico de los restos óseos.

Alentados por las virtudes del análisis de estroncio, al cual bastaban fragmentos de hueso para obtener información sobre subsistencia, numerosos estudios se sucedieron, diversificando los escenarios y circunstancias culturales donde ponerle en práctica (dieta animal/dieta vegetal, dieta terrestre/dieta marina, diferencias sociales relacionadas con

estatus). Otros estudios tuvieron por objetivo ampliar la gama de elementos traza a ser utilizados como marcadores tróficos (el bario, magnesio y el zinc, entre varios más, serían considerados).

Pero más allá del optimismo motivado en principio, es importante destacar que el arribo del análisis de estroncio a la arqueología tuvo por sustento tres premisas básicas: *a)* el proceso de biopurificación del calcio que disminuye la cantidad de estroncio en los organismos de los niveles tróficos superiores, documentado por múltiples estudios; *b)* los niveles del elemento en el tejido óseo reflejan los de la dieta; y *c)* una supuesta estabilidad *postmortem* del estroncio, según la cual el contenido en hueso de procedencia arqueológica correspondería al que en vida tuvo el tejido. Premisa ésta última para entonces no corroborada. Por ello, otros estudios en torno a la nueva técnica dieron prioridad a investigar la diagénesis ósea (alteraciones fisico-químicas ocurridas al hueso durante el tiempo que permanece en el subsuelo) y su impacto sobre los elementos traza. ¿Qué había cuantificado Brown en las colecciones analizadas?, ¿signos del metabolismo óseo, o de la contaminación mineral por la matriz del suelo? La biopurificación del calcio, fenómeno fisiológico irrefutable permitía suponer signos de metabolismo, pero ¿en qué medida?, y más importante aún, ¿cómo saberlo?. La diagénesis habría de convertirse en el más serio obstáculo a enfrentar, pues mientras no se reconociera, se desarrollaran métodos para evaluarla y contrarrestarla, cualquier estudio de paleodieta por elementos traza era objetivamente inviable.

En las siguientes páginas serán revisadas, de manera suficiente, las tres líneas de investigación arriba mencionadas: diversidad cultural y ecológica de su aplicación; la vertiente multielementos; y la relacionada con la diagénesis ósea.

Chalcatzingo, sitio mesoamericano del periodo Preclásico localizado en el valle de Morelos, México, también fue objeto del interés inicial motivado por la novedosa técnica de análisis óseo. Schoeninger (1979) evaluó el comportamiento entre dos métodos empleados para identificar diferencias de estatus social al interior de los grupos humanos. El primer método, de amplia aceptación en arqueología, tiene como algunos de sus parámetros principales el tipo y cantidad de objetos presentes en la ofrenda asociada a cada entierro; el otro, que sería puesto a prueba, consistió en reconocer diferencias en la dieta (consumo de recursos animales/vegetales) por medio del análisis de estroncio.

Los elementos de ofrenda considerados para Chalcatzingo fueron los tipos cerámicos, objetos de jade y piedra pulida, figurillas, y espejos de pirita. Sin embargo se tomó a la presencia/ausencia de objetos de jade como el mejor criterio diagnóstico de estatus social.

Por lo que toca al análisis químico de restos óseos, Schoeninger eligió una muestra de 43 individuos, todos adultos para evitar cualquier variabilidad asociada con la edad, y pertenecientes a la fase C (750-550 a.C.) del sitio caracterizada por su abundante número de entierros. El mal estado de conservación de los restos óseos hizo imposible una estimación del sexo de los individuos seleccionados.

La distribución del material arqueológico en la ofrenda, empleado como diagnóstico de estatus, dividió a la muestra ósea en tres grupos. Uno, el más privilegiado, cuyo común denominador fue la presencia de objetos de jade; otro, de rango intermedio, con piezas de cerámica; y el de menor jerarquía, donde los individuos carecían de ofrenda o, en su defecto, contaban con sólo objetos de piedra pulida (moretros, metates). Schoeninger observó que los niveles promedio de Sr para los individuos cuya ofrenda incluía piezas de jade (y por ende considerada de alto estatus) era menor al de aquellos otros acompañados

sólo de cerámica o incluso sin ofrenda. El análisis químico tendía a corroborar la subdivisión de la muestra esquelética en tres grupos, no obstante el traslape de los niveles individuales de Sr entre grupos.

Pero antes de poder atribuir a diferencias de estatus las respectivas mediciones de Sr, Schoeninger reconoció la necesidad de considerar y dar respuesta a otra variable de orden metodológico: el impacto de las diferencias metabólicas entre individuos de una misma población, es decir, ¿cuál es el rango normal de variabilidad en el contenido de Sr, del tejido óseo, entre individuos que consumieron un mismo tipo de dieta? Ante la imposibilidad de responder por medios experimentales en poblaciones humanas vivas, y puesto que el Sr se comporta igual en la hidroxiapatita de cualquier vertebrado, Schoeninger eligió a un grupo de 35 herbívoros (visones) al cual proporcionó el mismo alimento. Los resultados del experimento mostraron un coeficiente de variabilidad del 19.26%. Así, la autora concluyó que un coeficiente de 20% se esperaba registrar en seres humanos de una misma población arqueológica si todos los individuos hubieran consumido la misma dieta.

Para la muestra esquelética de Chalcatzingo estudiada, el coeficiente fue de 28%. Schoeninger consideró entonces que en el sitio hubo una relación directa entre el estatus social y el tipo de dieta, de manera que una mayor jerarquía del individuo estaba asociada a un mayor consumo de carne, traducido por los niveles más bajos de Sr en el tejido óseo.

Sin la disponibilidad de datos sobre las respectivas estimaciones de sexo, la autora no tuvo elementos de juicio para evaluar si el género de los individuos fue una condicionante en las diferencias de Sr reconocidas.

Enfoque multielementos

Basado en los principios de la discriminación fisiológica del estroncio y bario, misma que hace de ellos marcadores paleodietéticos válidos, Ezzo (1994a: 7-8; 1994b: 609-610) propuso que si a otros elementos traza se les pretende atribuir idéntica utilidad arqueológica primero se debe demostrar que cumplen los siguientes criterios:

- 1) El elemento debe ser medible en el tejido óseo.
- 2) Debe ser un reflejo directo de la ingesta dietética, y las concentraciones del elemento en los recursos alimenticios deben definir una separación trófica, u otra según la dieta, sea por medio de la biopurificación de un nutriente esencial.
- 3) El elemento debe depositarse mayoritariamente en el tejido óseo, e incorporarse específicamente en la estructura de los cristales de hidroxiapatita.
- 4) Es preferible que el elemento no sea un nutriente esencial, por lo tanto no sujeto a una estricta regulación homeostática.
- 5) El elemento debe imitar en los sistemas biológicos el movimiento y actividad de un nutriente esencial, de preferencia uno que se concentre en el hueso.
- 6) Es preferible que el elemento muestre baja movilidad iónica en el medio ambiente geoquímico, de modo que no sea tan susceptible a la diagénesis, y a los métodos químicos de limpieza de las muestras óseas que se desean analizar.

En suma, para que un elemento sea un indicador paleodietético válido debe ser incorporado a la estructura de la hidroxiapatita ósea a niveles proporcionales a los de la dieta; no debe ser un nutriente esencial, o sujeto a regulación metabólica.

Tomando como referencia los criterios por él establecidos, Ezzo (1994a) llevó a cabo una detallada revisión de las propiedades químicas, fisiológicas, metabólicas que en el

cuerpo humano presentan once elementos (aluminio, bario, calcio, hierro, potasio, magnesio, manganeso, sodio, fósforo, estroncio y zinc), y evaluar así para cada uno de ellos su potencial uso como indicadores paleodietéticos (para una revisión detallada del zinc, ver Ezzo 1994b). El autor concluyó que sólo el calcio, el bario y el estroncio cumplen tal propósito por ceñirse a los criterios. Vale la pena, sin embargo, detenerse en el magnesio.

En las investigaciones de paleodieta realizadas desde una perspectiva de multielementos, el magnesio suele estar presente, sea como criterio para evaluar diagénesis o como indicador de paleodieta. El interés por esta segunda aplicación obedece a que por formar parte fundamental de la molécula de la clorofila (Ezzo, 1994a: 15; Byrne y Parris, 1987: 375), el magnesio se presenta en niveles bastante más altos entre el reino vegetal que en el tejido blando de vertebrados terrestres y de peces, siendo las nueces las que presentan de las concentraciones más elevadas. Al no conocerse para el magnesio un proceso de discriminación fisiológica en su contra a favor del calcio, similar al que opera sobre el Sr o el Ba, dos alcalino térreos no esenciales, la presencia diferencial del magnesio entre los seres vivos antes señalada ha llevado a presuponer, de forma empírica y sin sustento fisiológico alguno, que sus niveles cuantificados en el tejido óseo reflejan de manera directa los de la dieta. Presupuesto, vale señalar, aplicado de igual modo a elementos traza y minerales distintos al Ca, Ba y Sr cuyas bases fisiológicas para estos últimos sí existen. Por tal motivo diversos autores han incorporado al magnesio en sus investigaciones sobre antiguas prácticas de subsistencia (ver Gilbert, 1975; Lambert *et al.*, 1979; Byrne y Parris, 1987; Francalacci, 1989; White y Schwarcz, 1989), pero a pesar de la variedad de circunstancias (cronológicas, medio ambientales, dietéticas) en las que se le ha puesto a prueba, en todos los casos el magnesio no ha respondido a las expectativas.

Para dilucidar si efectivamente el magnesio es útil o no, y evitando el factor diagenético propio de los restos arqueológicos, Klepinger (1990) llevó a cabo un estudio experimental con animales (cerdos), que divididos en dos grupos tuvieron como única diferencia el nivel de magnesio incorporado a la dieta. Durante los cinco meses del experimento, la alimentación baja en magnesio constó de 1260 ppm, mientras que la dieta suplementada de 2226 ppm. Ambos regímenes estuvieron por encima de los requerimientos mínimos de magnesio según la especie animal. Una vez sacrificados los especímenes, se analizó el contenido del elemento químico en el tejido compacto del metatarso. No obstante que la diferencia en el consumo de magnesio entre uno y otro régimen alimenticio fue de 180%, los niveles cuantificados en el tejido óseo de ambos grupos no resultaron significativamente diferentes (promedio del régimen bajo 2637 ppm, del alto 2660 ppm). Klepinger (1990) concluyó que el supuesto sobre el cual se basaba la utilización del magnesio como marcador dietético (los niveles óseos reflejan los de la dieta) es falso, y por ende el elemento es incapaz de identificar diferencias de subsistencia en restos humanos, ni que decir de los de origen arqueológico, donde la diagénesis, a la cual estuvieran sujetos, permitiría explicar de mejor manera cualquier diferencia significativa de magnesio entre individuos.

CAPÍTULO II

VARIABILIDAD BIOLÓGICA DE ELEMENTOS TRAZA

En cualquier área del conocimiento, el aporte de los pioneros es mostrar nuevas vías para responder a viejos problemas, y andar los primeros pasos. Eventualmente otros investigadores ampliarán los alcances, y evaluarán las implicaciones tanto de la nueva vía como de las respuestas que ella ofrece. Sin embargo, para que el proceso transcurra sobre bases sólidas, es imprescindible que mediante el tamiz de la crítica objetiva se consoliden los principios teórico-metodológicos que sustentan a la nueva propuesta.

Con el presente capítulo da inicio la presentación de los argumentos de crítica, esgrimidos durante los años 80s y 90s del siglo XX, respecto a los fundamentos del análisis de paleodieta por elementos traza. Se considerará en principio el impacto de la variabilidad *antemortem* de alcalino térreos, inter e intra individuo, producto de procesos fisiológicos relacionados con la edad, el sexo, y el tipo de tejido óseo (compacto o esponjoso). También se tratarán estudios sobre la distribución de alcalino térreos en ecosistemas modernos, pues cuestionan la eficacia de la relación Sr/Ca para discriminar por nivel trófico a las especies. La discusión de los principios básicos de la técnica de paleodieta proseguirá en el Capítulo III, cuando sea revisado el impacto de la diagénesis ósea.

Variabilidad inter individuo (edad y sexo)

Sin conocimiento de causa, las investigaciones de Brown (1973) y Schoeninger (1979) adolecieron de lo que después se reconocerían como deficiencias metodológicas, ya que a

la variabilidad generada por las características geográficas y de la dieta, existen otros dos factores capaces de incidir en los niveles biológicos de estroncio depositados en el tejido óseo: la edad y el sexo del individuo.

Al interior de cualquier población, los nonatos, neonatos y sujetos de la primera infancia poseen el nivel más bajo de estroncio, debido a que la placenta y glándulas mamarias son dos regiones adicionales de la anatomía materna donde ocurre también la biopurificación del calcio. De esa manera, el embrión primero e infante después, éste último mientras sea sólo amamantado, se ven expuestos a una dieta rica en calcio pero baja en estroncio, fenómeno reflejado en su esqueleto. Es de esperar que lo anterior tenga consecuencias sobre la fisiología materna, pues aunque la creciente demanda obliga a una mayor absorción intestinal de calcio para mantener el equilibrio homeostático, incrementándose también la del estroncio dadas las similitudes químicas con aquel, la constante transferencia de calcio hacia su producto provoca en el esqueleto de la madre valores altos de Sr/Ca, mayores a los de sus contrapartes masculinos, sin contar a los que deriven de la dieta (Sillen y Kavanagh, 1982: 73, 75; Price *et al.*, 1985: 424, 425; Price, 1989: 7, 8; Ezzo, 1994: 11, 12; Sandford y Weaver, 2000: 334; Mays, 2003: 731, 732). Como se recordará, Brown (1973) detectó las concentraciones más elevadas de estroncio en los individuos femeninos, atribuyendo tales diferencias entre sexos al tipo de dieta y por ende a diferencias de estatus social. Si bien semejante posibilidad existe, no pueden soslayarse como explicación alternativa los procesos fisiológicos antes descritos, de ahí la necesidad metodológica de conocer el sexo de los individuos a estudiar, cosa que Schoeninger (1979) por el mal estado de conservación del material esquelético no pudo hacer.

Conforme la dieta infantil es complementada con otros alimentos, al grado de quedar excluida por completo la leche materna, los niveles de estroncio disponibles a la fisiología y depositados en el esqueleto del infante se incrementan, siendo entonces el único filtro su propia biopurificación intestinal, proceso cuya eficacia se desarrolla con el tiempo y que se alcanza por completo en la edad adulta (Katzenberg *et al.*, 1996: 187-187; Mays, 2003: 731, 732). Es importante destacar que si bien se registra una tendencia a mayores valores de estroncio, la diversa eficacia individual del proceso de biopurificación en desarrollo, provoca, a su vez, amplios rangos de variabilidad en los niveles del alcalino térreo en los grupos subadultos. El incremento referido cesa en la etapa adulta, entre los 20-50 años de edad, cuando la concentración de estroncio en el tejido óseo luego de disminuir parcialmente, permanece estable y presenta rangos más estrechos de variabilidad. Por último, individuos más longevos registran ligero incremento en sus niveles de estroncio (Price, 1989: 7, 8).

Debido a la variabilidad registrada en los subadultos, se ha considerado como norma para las investigaciones de paleodieta, elegir muestras óseas sólo de individuos adultos. Sin embargo, el comportamiento fisiológico antes descrito ocurrido en los sujetos de la primera infancia (1-2 años de vida), dio pie para investigar mediante análisis de elementos traza el proceso de *weaning*, o ablactación, en las sociedades pretéritas, es decir, para estimar la edad aproximada a la que los infantes inician una dieta blanda en complemento a la leche materna.

Al respecto los estudios han sido escasos y los resultados poco alentadores (Katzenberg *et al.*, 1996; Mays, 2003; Sillen y Smith, 1984), pues los niveles Sr/Ca del tejido óseo subadulto confirman sólo parcialmente la tendencia por edad que se esperaría a

partir de bases fisiológicas como las arriba mencionadas, esto es: niños de 1-2 años de edad presentan niveles altos, que permiten interpretarlos como señal de una paulatina substitución de la leche materna por otro tipo de alimento. Sin embargo, los infantes menores al primer año de vida se caracterizan por altos niveles de Sr/Ca en hueso, similares a los del grupo de 2 años de edad, y no mucho más bajos como cabría esperar de individuos cuya alimentación consistiera exclusivamente de leche materna.

Y aunque para explicar tal discordancia pueda argumentarse a favor de una muy temprana incorporación de alimentos sólidos a la dieta infantil (o de leche de vaca como lo propone Mays (2003) en su estudio de 50 subadultos de una comunidad inglesa medieval), de ningún modo puede descartarse, no obstante los procedimientos utilizados para contrarrestarla y los parámetros que permiten evaluar su efecto, que los elevados niveles Sr/Ca sean resultado de diagénesis, sobre todo en neonatos e individuos de la primera infancia, cuyo esqueleto, además de ser más poroso y menos mineralizado, posee huesos largos con tejido compacto de poco diámetro cortical, características que lo vuelven en mayor grado susceptible a intercambio con los elementos químicos del suelo (Katzenberg *et al.*, 1996: 187-188; Mays, 2003: 734, 736, 739).

Intra-individuo

Obedeciendo a criterios como el estado de conservación o la existencia misma de la pieza ósea en el inventario esquelético de los restos humanos por analizar, las primeras investigaciones de paleodieta por análisis de elementos traza utilizaron muestras óseas de diferentes regiones anatómicas, e incluso de distinto tipo de tejido (compacto y esponjoso). Las mediciones de estroncio así obtenidas fueron tomadas como equivalentes,

presuponiendo por tanto que cualquier región anatómica proporcionaría estimaciones válidas para ser usadas en investigaciones sobre la subsistencia de una población y también entre poblaciones. Sobra comentar lo atractivo de semejante supuesto, pues si tomamos en cuenta que la técnica de análisis de Sr nació bajo la premisa de que el contenido químico de pequeñas muestras de hueso brindaban información directa de la proporción vegetal/carne en la dieta antigua, entonces, al no importar la región anatómica muestreada, literalmente cualquier hueso daba acceso a dicha información sin variabilidad de resultados, o en todo caso mínima. ¿Estaba justificada semejante apreciación?

Ante el incremento en el uso de la técnica Sr/Ca por parte de arqueólogos y antropólogos físicos, quienes realizaban además estudios comparativos entre sitios, se volvió imperativo investigar cuán amplios eran en efecto los rangos de variabilidad de elementos traza a nivel intra-individuo. ¿Efectivamente cualquier tejido (compacto o esponjoso) contenía concentración similar de elementos? Tan sólo la fisiología esquelética (distinto ritmo de remodelación) y la diagénesis, procesos que inciden de manera diferente debido a la estructura de cada tipo de tejido, apuntarían en sentido contrario. Bajo condiciones de cambios en la subsistencia, que modifiquen a su vez los niveles de elementos traza contenidos en la dieta, la remodelación ósea los reflejará primero en el tejido esponjoso, por lo que mostraría diferencias de composición química respecto al tejido compacto. En teoría, sin cambio en la dieta, las concentraciones *antemortem* tenderían a ser similares entre ambos, si bien factores fisiológicos relacionados con la edad y el sexo del individuo provocarían durante momentos específicos (embarazo, lactancia, ablactación) mayor variabilidad en la absorción de alcalino térreos (Ca, Ba, Sr), como se describió en párrafos previos.

En cuanto a los efectos de la diagénesis sobre los niveles de elementos de ambos tipos de tejido, Lambert *et. al.* (1982) fueron pioneros. Su estudio comparó tejido compacto de diáfisis de fémur y esponjoso de costillas. Quedaban cubiertas así las regiones anatómicas elegidas por los estudios de paleodieta hasta esa fecha realizados. Sin embargo, las conclusiones de Lambert y colaboradores (similitud de fémur y costillas en los niveles de Ca, Mg, Sr, Zn; contaminación de las costillas con Fe, Al, K, Mn) debieron tomarse con muchas reservas pues, como ellos mismos apuntaron, las muestras de ambos tipos de hueso no siempre correspondieron al mismo individuo.

También alentada por la necesidad de establecer certidumbre en los criterios básicos, Grupe (1988) cuantificó la concentración ósea de varios minerales y elementos traza (Ca, P, Sr, Ba, Mg y Zn), empleados en la reconstrucción de dietas, en una colección de 250 individuos pertenecientes a un sitio alemán de los siglos XI y XII d.C. Para eliminar variaciones en las estimaciones cuantitativas relacionadas con la edad de los sujetos, Grupe eligió únicamente adultos, si bien no especificó los rangos de edad ni el sexo. De cada individuo la autora obtuvo 3 muestras de hueso. Una de tejido compacto, tomada del extremo proximal de la diáfisis de fémur. Y dos de tejido esponjoso de la cresta ilíaca, una tomada del extremo anterior y otra del posterior. La autora decidió seleccionar a la cresta ilíaca, por que desde el punto de vista biomédico al tejido esponjoso de dicha región se le considera el estándar del esqueleto humano. El análisis comparativo reveló diferencias significativas en la concentración de elementos entre ambos tipos de tejido. De hecho las divergencias a nivel intra-individuo fueron mayores incluso que las registradas entre el tejido compacto de diferentes sujetos. En consecuencia, quedaba claro que cualquier interpretación respecto a la dieta antigua tendría un sesgo importante en caso de usar

indistintamente muestras óseas de uno y otro tipo de tejido, y por ende los resultados de ese modo obtenidos serían cuestionables, por no decir de poca utilidad.

Ante la diferencia registrada, ¿qué concentración es la más representativa del esqueleto como un todo? Más allá de consideraciones diagenéticas, parte de la respuesta radica en la proporción que ambos tejidos ocupan en el esqueleto humano. El compacto suma casi el 70% mientras que el esponjoso un 30%. Por otro lado, en éste último la remodelación ósea más acelerada refleja fenómenos metabólicos de más corto plazo, a diferencia del tejido compacto que, con un ritmo de remodelación más lento, su estructura y composición obedecen a procesos ocurridos bajo condiciones más constantes y a largo plazo. Tomando en cuenta lo anterior, el tejido compacto es representativo de la fisiología ósea y dieta promedio del individuo.

Aunque Grupe afirma, apoyándose en los estudios de otros investigadores, que la concentración de elementos traza es poco variable entre las diáfisis de huesos largos, recomienda que los sucesivos estudios de paleodieta uniformicen la toma de muestras y las obtengan de diáfisis de fémur o tibia, por ser éstas las de mayor diámetro de tejido compacto, permitiendo elegir muestras de su parte central menos expuestas a diagénesis. En lo sucesivo, la recomendación hecha por Grupe sería acatada.

Variabilidad en el reino vegetal

Como se recordara, Toots y Voorhies (1965) cuantificaron el contenido de estroncio de herbívoros fósiles hallados en estratos del Pleistoceno Inferior de una misma área geográfica. Las diferencias registradas entre especies, aunado al estudio de la morfología dentaria, permitieron distinguir dos regímenes alimenticios entre la muestra estudiada: uno

a base de pastos y el otro a base de hojas. Ya en párrafos previos se comentó sobre la influencia que tuvo el trabajo de Toots y Voorhies en el campo de la antropología, cabe ahora preguntar ¿por qué diferían los niveles de estroncio entre herbívoros? Al margen de otros factores de variabilidad, como por ejemplo eventuales movimientos migratorios y/o distinta capacidad intestinal de los vertebrados para discriminar a favor del calcio, los autores consideraron que el diferendo en cuestión era reflejo directo de los respectivos contenidos de estroncio característicos del alimento consumido de modo habitual por cada taxón, siendo el régimen a base de hojas el que provocó mayor concentración ósea del alcalino térreo.

Lo anterior significaba plantear de manera explícita que la relación Sr/Ca entre el suelo y las plantas no siempre era igual a uno, como lo dictaba el conocimiento predominante de la época (ver Comar *et al.* 1957: 486). Sin embargo, debido a su carácter pionero y a la falta de datos directos del reino vegetal que corroboraran sus resultados, la investigación de Toots y Voorhies (1965) ganó un lugar en la historia de los análisis de paleodieta no por la formulación de semejante cuestionamiento, que más bien pasó desapercibido, sino *sólo* por haber alentado nuevos estudios en la novedosa técnica de análisis químico. Así, el equilibrio de alcalino térreos entre el sustrato geológico y el tejido vegetal siguió considerándose válida, y significaría premisa básica para los estudios de paleodieta desarrollados en arqueología durante las dos décadas subsiguientes. Visto en retrospectiva, sería injusto no reconocer ahora que ambos autores señalaban, ya desde aquel entonces, una fuente adicional de variabilidad del estroncio que ingresa a las cadenas alimenticias, fenómeno cuyo reconocimiento cabal a finales del siglo XX arrojaría serias dudas sobre la utilidad y eficacia para inferir paleodieta con base en los elementos traza.

De manera esporádica se habían publicado varias investigaciones que tuvieron por objetivo evaluar desde dos perspectivas la relación Sr/Ca en el tejido vegetal. Primero, comparando los valores entre diversas especies y el del sustrato común donde habían crecido; y por otro lado, comparando los respectivos valores de las distintas regiones anatómicas de cada especie (raíz, tallo, ramas, hojas, frutos) entre sí y el del sustrato. Dichos trabajos no repercutieron en la arqueología hasta que Runia (1987) recabó los resultados, les confrontó a los de sus propios experimentos, y llegó a la misma conclusión formulada por quienes le precedieron: *a)* en la cadena trófica de un ecosistema terrestre, el proceso de biopurificación del calcio inicia no con los consumidores primarios (herbívoros) sino desde el primer nivel de la cadena, es decir, con los productores primarios (vegetales); *b)* el proceso de biopurificación referido, manifestaría diferente intensidad entre segmentos anatómicos de una misma especie y entre especies vegetales. Lo anterior significaba, en suma, que el supuesto equilibrio de Sr y Ca entre las plantas y el suelo donde crecen carecía de validez.

Ante lo incontrovertible de los resultados, Runia hizo un primer balance del efecto que esta nueva fuente de variabilidad, no antes contemplada por los estudios, tendría en los análisis de elementos traza de restos humanos. Él percibió que la nueva variable agregaba mayor complejidad a las investigaciones, pero sobre todo, aportaba gran ambigüedad a los resultados y al objetivo que perseguía la técnica misma, pues en lo sucesivo los valores biogénicos (*antemortem*) de Sr/Ca de los restos humanos ya no podrían seguir interpretándose como reflejo exclusivo de la proporción de recursos vegetales/recursos animales consumida por el individuo, sino también, en parte, como consecuencia de los niveles de estroncio y calcio específicos del tipo de vegetales incorporados a la dieta. Dicho

de otro modo: aún cuando fuesen iguales la composición química del suelo y la cantidad relativa de ambos recursos alimenticios (plantas, carne), la relación Sr/Ca en restos óseos de dos poblaciones sería diferente en la medida que lo fueran también las especies vegetales, y sus respectivos niveles de alcalino térreos, consumidas por cada grupo. De acuerdo a la forma convencional en la que venían interpretándose los resultados, las más altas concentraciones de estroncio en el hueso estarían asociadas a un mayor consumo de vegetales. Sin embargo, al reconocerse la diversa intensidad en el proceso de biopurificación del calcio en las plantas, la interpretación ya no era necesariamente correcta. De hecho la variable intensidad del proceso referido hacía factible también otro escenario, en el que contrastantes cantidades de carne incorporadas a la dieta habitual darían por resultado idénticos valores de Sr/Ca en el esqueleto de los individuos.

Pero las dificultades enfrentadas por la técnica para inferir paleodieta no se limitaban a los escenarios antes descritos. Al ser los herbívoros organismos selectivos en su alimentación (no todos consumen todo tipo de plantas), se manifestarán diversos rangos de Sr/Ca entre la estructura esquelética de las varias especies. El hecho cobra importancia si tomamos en cuenta que por razones metodológicas la técnica dictaba comparar los valores Sr/Ca de los restos humanos bajo estudio con aquellos otros de “un herbívoro típico de la región”. Los restos de fauna actuarían como un parámetro para evaluar: *a)* posible contaminación diagenética de las muestras óseas, a traducirse por un mayor contenido de estroncio en las de origen humano, y *b)* para conocer qué tan cerca o lejos del “espectro herbívoro” se hallaba la dieta de la sociedad. En opinión de Runia (1987), ambas estimaciones de orden metodológico perdían validez, a causa de la biopurificación del calcio ocurrida al inicio de la cadena alimenticia. Propuso que dependiendo del herbívoro

elegido como parámetro, y de las características de su dieta, era factible cuantificar incluso en restos humanos mayores cantidades de estroncio, sin que hubiese mediado proceso diagenético alguno. Bastaba con que la dieta del animal fuera pobre en estroncio y rica la de los sujetos. Es obvio que dejaba de ser lo mismo elegir a cualquiera de las especies herbívoras locales. ¿Cuál escoger entonces como referencia?, ¿convenía elegir de entre aquellas con alto, intermedio, o bajo contenido de estroncio?. Debido a que las concentraciones de las muestras humanas podían traslaparse con la de los herbívoros típicos de la región, el espectro herbívoro estimado por el nivel de estroncio no sería real.

Aunque la investigación de Runia (1987) tuvo como punto de partida exclusivamente el análisis químico del tejido vegetal, sus resultados le permitieron inferir lo ya descrito. Quedaba estimar, mediante, el análisis de cadenas tróficas modernas, cuán certero había sido en sus planteamientos, pero más importante aún, sobre el futuro de la técnica misma.

Variabilidad en ecosistemas modernos

Sin duda el método más idóneo para formarse una idea aproximada, y más objetiva, sobre la distribución de elementos traza entre organismos de cadenas alimenticias antiguas, es realizando investigaciones sobre la flora y fauna de ecosistemas modernos de áreas geográficas delimitadas. De esa manera, sin el tamiz de la diagénesis, se podría conocer cómo opera la biopurificación del calcio en medio ambientes concretos y, por añadidura, cuán validas son las reconstrucciones de paleodieta formuladas a partir de la relación Sr/Ca y Ba/Ca de restos óseos humanos.

Hacia principios de los años 80, del siglo XX, existía un sólo ejemplo de semejante tipo de estudios. La biopurificación del calcio y segregación de las especies por nivel

trófico reportadas por Elias *et al.* (1982) en un ecosistema subalpino, significaron para muchos investigadores la evidencia de que a través de la técnica Sr/Ca se podía conocer la composición general de la dieta antigua. A falta de otros trabajos similares, los resultados de Elias *et al.* (1982) fueron considerados de validez universal. Quedaba comprobarlo.

Para ese propósito una de las primeras investigaciones fue el trabajo a largo plazo emprendido por Sealy y Sillen (1988) quienes, interesados en la dieta de los antiguos cazadores-recolectores de Southwestern Cape, Sudáfrica, analizaron la distribución de Sr y Ca en cadenas alimenticias de origen marino y terrestre. Las especies elegidas para el estudio fueron ejemplares modernos de aquellas que integraron la dieta antigua, de acuerdo a evidencia arqueológica y etnohistórica.

Si bien las muestras fueron tomadas de cuatro localidades con propiedades geológicas diferentes entre sí, al comparar los resultados Sr/Ca de la fauna por localidad, se observan niveles similares por especie, es decir, la geología no representó un factor importante de variabilidad. Agrupando a la fauna terrestre no por categorías taxonómicas sino por el tipo general de dieta, resulta claro el traslape entre carnívoros (rango Sr/Ca= 0.3 a 1.6) y herbívoros (Sr/Ca= 0.3 a 5.2). No ocurre la esperada separación por nivel trófico. De hecho el panorama se vuelve desconcertante, pues el leopardo, cuya dieta comprende sólo carne, posee los rangos más altos (0.8 a 1.6), mientras que el zorro cuya dieta más variada incluye también reptiles, insectos, huevos de ave, muestra valores inferiores. Tal fenómeno obedece a que el leopardo de la región tiene como presa habitual a un herbívoro cuyo alimento, a su vez, posee altos valores de Sr/Ca. La esperada separación trófica se observa únicamente cuando se comparan los valores Sr/Ca del herbívoro y su alimento, del predador (leopardo = 0.8 a 1.6) y su respectiva presa (hyrax = 3.0 a 5.2).

En suma, el análisis de las especies de ecosistema terrestre indicaban que: existe diversidad en los valores Sr/Ca al interior de cada nivel trófico; la diversidad llega a tal grado que los niveles se traslapan, es decir, no existen rangos exclusivamente herbívoros, carnívoros, etc; en consecuencia, no existe una sola especie representativa del herbívoro tipo, ni del carnívoro tipo. Tales abstracciones carecen de sentido; la separación trófica se percibe cuando se analizan verdaderas relaciones alimenticias. Claro, agregaríamos, siempre y cuando la dieta la integre casi en su totalidad un solo tipo de alimento, como en el caso del leopardo-hyrax, pues organismos con hábitos más heterogéneos, como el zorro, podrían verse separados por nivel trófico respecto a una parte de su menú pero no hacia otra.

Gilbert *et al.* (1994) dieron continuidad a las investigaciones en la misma región de Sudáfrica, agregando para esa ocasión al bario dentro de los elementos a monitorear, debido a su ya reconocida importancia en los estudios de paleodieta (ver Burton y Price 1990, en el Capítulo IV, Dieta y Recursos Acuáticos). En lo que al medio terrestre se refiere, los valores Ba/Ca muestran mayor reducción entre niveles tróficos que los de Sr/Ca. Resultado previsible si se toma en cuenta que el metabolismo de los mamíferos discrimina más en contra del Ba que del Sr. Sin embargo, a pesar de ello, los valores de Sr/Ca y Ba/Ca de carnívoros y herbívoros sufren traslape. Esto es en parte resultado de la ya reconocida variabilidad de Sr/Ca presente en la base de la pirámide y que repercute en los niveles superiores de la misma, además otro aspecto a tomar en cuenta es la heterogeneidad geológica de la región donde fueron tomados los especímenes. Al igual que con la investigación previa (ver Sealy y Sillen, 1988), Gilbert y colaboradores observaron una

separación trófica entre especies sólo cuando se comparan los valores Sr/Ca y Ba/Ca de predador y su respectivas presas, fenómeno también registrado por Burton *et al.* (1999) en áreas boscosas de los Estados Unidos.

En suma, los estudios de ecosistemas modernos (ver también Schoeninger, 1985; Sillen, 1988) formularon serios cuestionamientos a la técnica Sr/Ca como parámetro para estimar la composición de la dieta antigua. Evidenciaban una gran diversidad de valores Sr/Ca al interior de cada nivel trófico. El traslape registrado entre los estadios de la pirámide significaba la ausencia de fronteras fijas y universales que en términos de la relación Sr/Ca separen siempre a los herbívoros de los carnívoros, e incluso, a las especies terrestres de las marinas (esto último a tratarse en el Capítulo IV, Dieta y Recursos Acuáticos). La aparente sencillez que caracterizó al análisis de elementos traza durante su inicial incursión en la arqueología, años 70s del siglo XX, se transformaba menos de veinte años después en inquietante complejidad, pero no sólo a causa de la diagénesis ósea, como se verá en el Capítulo homónimo, sino también por las dificultades inherentes para comprobar la premisa básica de la técnica: el uso de los niveles de estroncio, o Sr/Ca, como medida de la proporción en la que los tejidos vegetal y animal se incorporaron en la dieta.

CAPÍTULO III

DIAGÉNESIS DEL TEJIDO ÓSEO

Conforme los procesos de descomposición y putrefacción cadavérica retiran el tejido blando que protegía al esqueleto, el tejido óseo se ve inmerso en un medio ambiente muy distinto de aquél que promovió su desarrollo. Sujeto a las particulares condiciones de humedad, temperatura, hidrología, químicas, orgánicas y de acidez propias del suelo donde quedó enterrado el cadáver, inicia para el tejido óseo su proceso de diagénesis, entendiendo por éste su alteración química *postmortem*.

Como se recordará, la inicial aplicación en antropología de la técnica Sr/Ca tuvo como premisas básicas: la biopurificación del calcio en contra del estroncio conforme se asciende en la cadena alimenticia, y la estabilidad *postmortem* del estroncio biológicamente depositado en el tejido óseo. A lo largo de las páginas precedentes ya se comentó sobre la primera, cabe ahora hacer lo propio para la segunda premisa.

Si las concentraciones biogénicas (*antemortem*) de estroncio, calcio y otros elementos de interés eran sujetas a diagénesis, ¿cómo reconocerlo?, ¿cómo cuantificarlo?, ¿cómo contrarrestarlo?, ¿qué validez sobre la dieta antigua tendrían las estimaciones de Sr/Ca de restos humanos? No es exagerado decir que de la diagénesis dependían los beneficios ofrecidos por la técnica: conocer de manera directa, mediante el análisis químico de fragmentos óseos, las características de la subsistencia de las sociedades humanas pretéritas. Tal era el acervo directo de información que estaba en juego, sería una pena privarse de él. No sorprende entonces que la diagénesis ósea, en particular de su fase

mineral, pues en ésta se deposita casi la totalidad del Sr asimilado, acaparara la atención de los investigadores. En seguida se presentan algunos ejemplos ilustrativos, respetando en la medida de lo posible el orden cronológico.

Reconociendo el problema

Sillen (1981) vio en los restos faunísticos localizados al interior de la cueva Hayonim, Israel, el medio ideal para evaluar de manera directa si el estroncio contenido en el tejido óseo permanecía estable al paso del tiempo, tal y como lo planteaban otros investigadores. Sillen estudió dos periodos cronológicos de la cueva. El más antiguo, Aurignacian, databa de 16 000 a 20 000 años a.C., y el más reciente, Natufian, de 10 000 a.C. En la colección faunística de ambos periodos estaban representadas especies similares, tanto de herbívoros como de carnívoros. Por su parte, los únicos restos humanos localizados en la cueva provenían del periodo Natufian. De esa manera la investigación contaba con tres constantes (mismo sitio; mismas especies, y por ende misma dieta por ellas consumida). El tiempo, y su efecto sobre el estroncio, constituía la única variable, cuya estimación era por demás relevante respecto a la diagénesis o no del elemento.

A través de la cuantificación Sr/Ca de los restos de ambos periodos cronológicos, Sillen estimó el efecto de la variable tiempo. Si en cada caso las especies eran separadas de acuerdo al nivel trófico que les correspondía, entonces la diagénesis de estroncio no había ocurrido, o cuando menos no había modificado significativamente los valores biogénicos pese al largo lapso de tiempo transcurrido. Es decir, los niveles Sr/Ca medidos corresponderían a los niveles *antemortem*. Eso ocurrió sólo para los restos del periodo más reciente, Natufian, donde las especies herbívoras ocuparon posición opuesta a las

carnívoras, mientras que los humanos se ubicaron en una posición intermedia, confirmando así su carácter omnívoro, inferido por evidencias arqueológicas asociadas. Panorama muy diferente fue el que revelaron los valores Sr/Ca de las muestras del periodo Aurignacian, el más antiguo, pues la esperada separación trófica no sucedió.

La diferencia de tiempo entre ambos periodos (casi 10 mil años) volvía factible suponer cambios en el ecosistema, que derivaran en diferentes concentraciones de estroncio circulando en la cadena alimenticia de cada momento. Sin embargo, Sillen consideró que tal posibilidad no explicaba el traslape de Sr/Ca observado en la fauna del periodo Aurignacian, ni mucho menos daba cuenta de la tendencia manifiesta al comparar los resultados de ambos periodos: la concentración de estroncio de los carnívoros más antiguos resultó más elevada a la de sus congéneres posteriores, mientras que la de los herbívoros fue menor respecto a sus contrapartes del periodo posterior. Dicho de otro modo, al cabo del tiempo, durante el periodo Aurignacian, se homogeneizaron los valores de estroncio de todas las especies, sin importar su régimen alimenticio, respecto al valor de la matriz donde yacían sus restos. El estroncio sufría de un importante proceso de diagénesis volviendo inteligible cualquier diferencia según el tipo de dieta.

A manera de conclusión, Sillen destacó que la técnica de Sr/Ca en tejido óseo resultaba eficaz para separar por nivel trófico restos fuanísticos y humanos, como lo pudo constatar con las muestra del periodo Natufian. No obstante, era necesario reconocer, dicha técnica no operaba con idéntica efectividad en todos los casos, ni siquiera en un mismo sitio, pues se ve limitada por la diagénesis que afecta también al estroncio. En lo sucesivo, señaló, es imprescindible no aplicar la técnica “al vacío”, sino emplear siempre, como controles indispensables de diagénesis, los niveles Sr/Ca de herbívoros y de carnívoros que

habitaron, durante el mismo periodo cronológico, en la misma área que los humanos cuyo tipo de subsistencia se quiere conocer mediante el análisis químico de sus restos óseos.

La afortunada conjunción de circunstancias, traducidas en tres constantes (mismo sitio, mismas especies, misma dieta por especie) y una variable (tiempo: dos periodos cronológicos), mostró de manera elocuente que la supuesta, y tan deseada, estabilidad universal del estroncio biogénico, durante la etapa *postmortem* del tejido óseo, se prefiguraba como un mito. Sin embargo debía primero evaluarse su comportamiento en distintos contextos arqueológicos, incluyendo los de periodos cronológicos más recientes.

Lambert *et al.* (1985) realizaron de las primeras investigaciones sistemáticas en torno al efecto de la diagénesis sobre la información de paleodieta presente en el hueso. Los autores midieron el contenido de varios elementos (aluminio, calcio, cobre, estroncio, hierro, magnesio, manganeso, plomo, potasio, sodio y zinc), con el objetivo de evaluar dicho proceso a tres niveles: *a)* individual, comparando dos regiones esqueléticas del mismo sujeto; *b)* al interior de una misma población arqueológica, comparando grupos de edad, y *c)* en el hueso como unidad de análisis, comparando entre su superficie y áreas subyacentes de tejido. Las muestras óseas fueron tomadas de dos sitios de Illinois, Estados Unidos (Woodland Ledders, 1000 d.C.; Woodland Gibson, 200 d.C.).

A nivel individuo, las regiones anatómicas comparadas fueron costillas y fémur (a mitad de diáfisis), en espera de que las primeras, por predominar en ellas tejido más poroso (trabecular), mostraran alteración diagenética más severa. El análisis químico dio como resultado segregar a los elementos cuantificados en tres grupos, según su comportamiento: el estroncio, magnesio y zinc conservaron niveles similares en ambas regiones anatómicas, indicio de mínima diagénesis; el calcio, plomo y sodio tuvieron concentraciones más bajas

en las costillas, fenómeno que pudo estar asociado a diagénesis y/o procesos fisiológicos; el aluminio, cobre, hierro, manganeso y potasio tuvieron nivel más alto en las costillas, identificándolos así como contaminantes que proceden del suelo.

Respecto a la comparación entre grupos de edad de una misma población, los elementos reconocidos como contaminantes en el apartado anterior (Al, Fe, K, y Mn) presentaron niveles muy altos en los infantes, como cabría esperar dado la poca mineralización del tejido a esas edades, mientras que en el resto de los grupos se observó un menor pero paulatino incremento con la edad, atribuible a la pérdida de mineralización y por ende mayor porosidad ósea. Es decir, en los infantes y adultos avanzados la diagénesis resulta más severa. El estroncio, sodio y zinc decrecen ligeramente con la edad, fenómeno que puede ser consecuencia fisiológica y no diagenética, como ocurre con el calcio en los adultos medios y longevos.

El último nivel de estudio, que tuvo al hueso como entidad de análisis, comprendió sólo muestras de fémur tomadas a la mitad de su diáfisis. La superficie ósea mostró siempre altos registros de los elementos considerados contaminantes, hecho no observado en las capas subyacentes de tejido, mientras que el Sr, Ca, Pb, Na y Zn mostraron distribución homogénea en el tejido. Complemento a la prueba anterior, los autores realizaron otra, que permitiera identificar *in situ* la dirección del intercambio químico entre el hueso y el suelo. Para ello analizaron muestras de suelo tomadas a intervalos fijos de distancia (5 cm) desde los restos óseos de entierros hacia todas las direcciones (arriba, abajo, a los lados), planteando que cuando el tejido pierde parte de sus elementos constitutivos originales, la concentración de éstos será mayor en el suelo de inmediata cercanía y menores en el más alejado, caso contrario cuando el hueso es contaminado por el suelo adyacente.

Los resultados mostraron una distribución homogénea de estroncio y zinc, es decir, no hubo intercambio de éstos; sin embargo el calcio presentó niveles más altos en las inmediaciones del hueso, sinónimo de que el intercambio químico sucedió desde el tejido al suelo (fenómeno conocido como *leaching* o lixiviación). Por su parte, el aluminio, hierro y potasio mostraron más bajas concentraciones en la proximidad del hueso, indicio de intercambio desde el suelo al tejido, es decir, contaminación. Los autores hacen un comentario especial para la presencia homogénea mostrada por el sodio, pues al ser el ion metálico más soluble de los estudiados, su efecto diagenético puede ocultarse cuando se analiza su cantidad en el suelo, ya que eventuales corrientes subterráneas de agua tendrían como resultado una similar distribución del elemento en el terreno.

La investigación de Lambert *et al.* (1985) mostró el comportamiento diagenético de varios elementos químicos que componen el tejido óseo humano. De ellos, el Sr y el Zn fueron los únicos en no ser afectados por la diagénesis, mientras que se identificó carácter contaminante para los niveles de Al, Fe, Mn y K. Aunque fueron sujetos a cierta pérdida (lixiviación), el Ca y Na seguían siendo útiles para los estudios de paleodieta. Los autores reconocieron que sus resultados podían perder validez en otras circunstancias medioambientales de enterramiento, pero ello no impidió ver como un signo alentador, a la poca variabilidad por diagénesis reportada para el estroncio, pues implicaba una fuerte correspondencia con el estado *antemortem* del elemento, y por ende con la dieta. Sin embargo, otras investigaciones llegarían a conclusiones diferentes, suscitando más incertidumbre e interés sobre el tema en virtud de su capital importancia.

Ezzo (1992) tuvo como propósito evaluar sobre un mismo conjunto esquelético la efectividad del Ba y Sr como marcadores de paleodieta, y el efecto de la diagénesis sobre

ellos, siendo ésta última a estimarse por primera vez en el bario (elemento cuya utilidad trófica fue señalada por Elias *et al.*, 1982 y Burton y Price, 1990. Ver Capítulo IV). Para tal fin el autor escogió un grupo de 82 especímenes arqueozoológicos localizados en tres niveles estratigráficos, comprendiendo en conjunto un lapso de mil años, del sitio Ventana Cave, en el desierto de Arizona, EUA. Aunque la cueva también había aportado restos humanos, en virtud de sus objetivos, Ezzo decidió analizar sólo muestras de fauna, al asumir que las dietas animales son más constantes, es decir, menos diversas y sin cambios a través del tiempo como son las dietas humanas.

Los 82 especímenes elegidos no fueron agrupados por categorías generales (herbívoros, carnívoros) sino que el autor los separó por taxón, poniendo particular énfasis en distinguir predadores y presas, y que las mismas especies animales de dichas relaciones tróficas quedaran representadas en los tres niveles estratigráficos estudiados.

Para evaluar el proceso de diagénesis de los restos óseos utilizó varios criterios: el valor Ca/P; la concentración de los elementos indicadores de paleodieta (Ba, Sr), la de aquellos otros elementos que suelen incorporarse *postmortem* al tejido óseo (Al, Fe, Mn) o perderse de él (Mg, Na); y siguiendo con la lógica de la estabilidad en la dieta de la fauna, analizó también muestras de ejemplares modernos de las mismas especies y de la misma región. Una vez hecho el análisis químico de los restos, las concentraciones de los elementos cuantificados se compararon en sentido diacrónico, al interior de cada taxón para observar la estabilidad o no de los elementos con el transcurrir del tiempo, y en sentido sincrónico, en especial entre predadores y presas donde se esperaba observar una clara separación trófica generada por el Ba y Sr.

En cuanto a los resultados, el Sr mostró relativa estabilidad por taxón aunque sólo para los dos niveles estratigráficos más recientes ya que en el tercero los valores fueron más elevados. Esto último indicio de que la diagénesis provocó, al cabo del tiempo contaminación por Sr. El proceso operó a distinto ritmo para el género de los Lagomorfos que, debido a una menor densidad de su tejido compacto, presentaron concentraciones igual de elevadas desde el primer nivel estratigráfico. Razón suficiente para que los Lagomorfos fueran excluidos de la estimación de paleodieta por medio del contenido de Sr, quedando reducida a los tres géneros de carnívoros felinos, cánidos y tejones, y al otro de herbívoros (Artiodáctilos) pertenecientes a los dos niveles superiores. Aun cuando no se detectó contaminación por Sr para esas muestras, y por ende el contenido del elemento fue considerado de origen biogénico, no se observó una separación trófica de las especies, ni siquiera de los Artiodáctilos con respecto a los Cánidos que, en opinión del autor eran sus predadores principales. Ezzo corroboró la contaminación de las muestras más antiguas y el carácter biogénico del Sr de las más recientes al comparar los resultados con los de las especies modernas.

El Ba, por su parte, exhibió comportamiento muy diferente al del Sr, pues fue más estable en los tres periodos cronológicos y resultó eficaz para la separación trófica de los tres géneros de carnívoros respecto a los de herbívoros. El contenido de Ba de las muestras modernas quedó incluido en el rango de la respectiva especie arqueológica. El Ba de la fauna de Ventana Cave se consideró biogénico.

Ezzo (1992) concluyó que en ecosistemas desérticos como el de Ventana Cave el Ba era un mejor parámetro para el estudio de la paleodieta que el Sr, si bien quedaba por averiguar cuán remoto en el tiempo se extendía su efectividad.

Llama la atención que todavía a principios de la última década del siglo XX hubiera investigadores (entre ellos, Ezzo) quienes consideraran al contenido absoluto de Sr y Ba del tejido óseo los criterios fundamentales para el análisis de paleodieta, cual si fueran variables independientes, y no la relación entre ambos (Ba/Sr), o de ellos con el calcio (Sr/Ca, Ba/Ca) respecto al cual son discriminados a lo largo de las cadenas alimenticias mediante el proceso de biopurificación del calcio. Aunque el autor incluyó en el anexo los valores Ba/Sr de las muestras analizadas, estos no merecieron ningún comentario, ni fueron utilizados como criterios paleodietéticos.

Vale la pena detenerse en el comentario hecho por Ezzo referente a la relación Ca/P como indicador de diagénesis. El calcio y el fósforo son los dos constituyentes principales de la fase mineral del tejido óseo, la hidroxiapatita, donde también se depositan el Sr y Ba, que en condiciones *antemortem* se caracteriza por una masa teórica de $\text{Ca/P} = 2.15$. Ese valor sirve como referencia para estimar la integridad de la hidroxiapatita de restos arqueológicos, pues mide en particular el enriquecimiento o pérdida de ambos iones. Elevados valores indican incorporación de iones calcio que suelen hacerlo bajo la forma de carbonato, el cual, a su vez, tiende a asociarse con los iones de estroncio presentes en el suelo. Es en este sentido que la relación Ca/P constituye un parámetro general, indirecto, y no siempre efectivo de la diagénesis de estroncio en restos arqueológicos, como lo deja ver el caso de Ventana Cave, donde las muestras de fauna contaminadas con estroncio tuvieron valores Ca/P cercanos al teórico y similares a los de las muestras no contaminadas (ver también Radosevich, 1993: 317-319).

La investigación de Ezzo (1992) tuvo varias implicaciones. Por un lado corroboraba, en una muestra faunística de origen arqueológico, lo que Elias *et al.* (1982) había registrado

en un ecosistema subalpino moderno: el proceso de biopurificación del calcio en contra del bario era más severo que el sufrido por el estroncio. En virtud de lo cual, el bario, y no el estroncio, mostraba mayor eficacia para separar por nivel trófico a especies de vertebrados terrestres. Por otro lado, el estroncio era sensible a la diagénesis, mientras que el bario denotó estabilidad. Sin otro antecedente, a raíz de los resultados de Ezzo (1992), el bario se consideró poco susceptible de sufrir cambios *postmortem*, reforzando así su ya reconocida utilidad como marcador trófico (ver Burton y Price, 1990).

En un esfuerzo por sintetizar el comportamiento diagenético que hasta entonces refería la literatura para diversos constituyentes químicos del tejido óseo, Price *et al.* (1992: 519) realizaron el siguiente balance: el aluminio, cobre, hierro, magnesio, manganeso y zinc suelen incorporarse al hueso debido a importante actividad diagenética; el magnesio y sodio tienden a perderse a lo largo del tiempo; mientras que el bario, calcio y estroncio muestran relativa estabilidad, por lo que su presencia en el hueso obedece principalmente a la actividad biológica del tejido. En el caso específico del estroncio, luego de revisar estudios recientes sobre el tema, concluyen que su concentración *antemortem* en el hueso, a veces más u otras menos, se ve alterada por diagénesis. A pesar de ello, el efecto tiende a ser menor del observado en otros elementos, siendo el mecanismo predominante la incorporación de estroncio y no su pérdida por lixiviación (*leaching*).

Mecanismos de diagénesis

En términos generales se reconocen cuatro mecanismos de diagénesis para la fase inorgánica del hueso, mismos que no se excluyen entre sí (Hoppe *et al.*, 2003: 26; Lee-Thorp, 2000: 90-93; Nielsen-Marsh y Hedges, 2000a: 1144, y 2000b: 1156; Price *et al.*,

1992: 516; Sandford y Weaver, 2000: 334-335; Sillen, 1989: 219-223, 227, 228; Sillen *et al.*, 1989: 508-509; Tuross *et al.*, 1989: 661, 662, 669, 670):

- a) Minerales como la calcita (CaCO_3), carbonato (CO_3^{-2}), barita (BaSO_4), óxidos de F, Mn y otros elementos como el aluminio, estroncio, cobre, presentes en el suelo se depositan en los diminutos poros del tejido, o en imperfecciones de su superficie, sean fisuras o fracturas. En este caso la incorporación de elementos y minerales exógenos es de carácter física, pues no establecen reacción química con la hidroxiapatita ósea. Tanto el carbonato como la calcita suelen asociarse con el estroncio o bario disponibles en el suelo, así estos dos últimos se depositarían de manera independiente y/o como parte de un mineral.
- b) Iones solubles que existen en el suelo (carbonato, Sr^{+2} , Pb^{+2} , Ba^{+2} , F^{-1}) sustituyen a los de la hidroxiapatita (OH^{-1} , CO_3^{-2} , PO_4^{-3}). Aunque semejante intercambio iónico puede ocurrir en la superficie y estructura de los cristales de hidroxiapatita, es en la superficie donde los iones presentan mayor actividad, pues los de la estructura son más estables.
- c) Recristalización de la apatita, es decir, los cristales promueven la formación de nueva apatita pero de origen diagenético, pues se ve sujeta a los intercambios iónicos antes mencionados, y se depositará junto a la de origen biológico. Mediante éste mecanismo existirían dos apatitas pero de distinta naturaleza y composición, siendo la diagenética más carbonatada.
- d) Disolución y recristalización. Para efectos de cualquier estudio dirigido a obtener información biológica mediante el análisis químico de la fase inorgánica de restos óseos antiguos, este mecanismo diagenético constituye el más desfavorable de todos,

pues implica que la apatita biológica es disuelta, luego intercambia iones con el suelo, después se deposita y recristaliza sobre el hueso la nueva apatita resultante, formada por completo *in situ*. Si ya la sola disolución implica para el tejido óseo pérdida de elementos cuyo depósito obedeció a procesos metabólicos, la posterior reacción química y recristalización significa además incorporar elementos exógenos que no responden a proceso fisiológico alguno. De ese modo la diagénesis altera tanto la proporción relativa de elementos y la variedad de ellos en la hidroxapatita original, perdiéndose toda información útil sobre la fisiología esquelética. Un entorno alcalino conserva en buen estado a la fase mineral del tejido óseo, pero uno ácido la disuelve. Condiciones de acidez pueden ser propios del tipo de suelo donde yacen los restos óseos, o consecuencia indirecta de la acción de los microorganismos anaerobios que intervienen en la descomposición del tejido óseo, cuyo 30% de proteína (en su mayoría colágeno) representa para ellos una fuente de alimento. Los microorganismos atacan en principio a la proteína no mineralizada, pero no pueden asimilarla de forma inmediata y deben descomponerla primero en segmentos más pequeños (monómeros), y luego en sus elementos individuales, empleando para ello una enzima específica, la colagenasa. Mientras eso sucede y como desechos de su propia fisiología, los microorganismos excretan sobre el hueso ácidos orgánicos que pueden disolver a la hidroxapatita, consiguiendo así de modo indirecto acceso a más proteína (Child, 1995a y b). Contrario a la imagen que puede evocar lo antes dicho, la disolución no suele ser total, pues ocurre en baja proporción, como lo demuestra el hecho de que restos arqueológicos de diverso origen geográfico conservan elevado porcentaje de proteína, a juzgar por los niveles de carbono y nitrógeno reportados.

De los cuatro mecanismos de diagénesis recién descritos, el primero significa contaminación un tanto superficial y no conlleva reacción química entre componentes del suelo y hueso, a diferencia de lo ocurrido en los otros tres. En todos, sin embargo, el carbonato desempeña papel relevante, sea como mineral o ion soluble, por varias razones: *a)* su presencia es muy frecuente en la composición de los suelos; *b)* puede intercambiarse con el carbonato de la apatita biológica o agregarse a ella; *c)* es parte fundamental de la apatita diagenética, que se caracteriza por ser carbonatada, es decir, tener alto contenido de dicho mineral; *d)* con facilidad se asocia al Sr^{+2} , Ba^{+2} , Pb^{+2} , Ca^{+2} , incorporándolos también a la apatita diagenética. En suma, es un mineral que combinado con otros iones del suelo puede modificar los niveles biológicos de carbonato, estroncio, calcio, bario y carbono del hueso, impidiendo con ello cualquier estudio de paleodieta por elementos traza. No sorprende entonces que el carbonato se haya convertido en motivo de constante atención de los esfuerzos dirigidos a contrarrestar la diagénesis.

Contrarrestando los efectos

Sin ser posible separar por medios mecánicos a las apatitas (biológica y diagenética), Sillen (1989: 223-227) propuso que la distinta composición química de ellas podía significar también distinta solubilidad. Al sumergirlas en una solución ácida (pH 4.5), la más soluble será siempre aquella con mayor contenido de carbonato, o sea la formada durante la diagénesis. Gracias a semejante disociación química se eliminaban los excesos de carbonato y de otros iones en la fase mineral del hueso. Eso permitió librar el obstáculo más serio que por muchos años habían enfrentado las investigaciones de paleodieta por análisis de elementos traza, volviéndose ya por añadidura técnicamente viables.

Sillen puso a prueba el método de limpieza química en restos fósiles de un mismo contexto pero cuyos valores de Sr/Ca no eran acordes a lo esperado, por ejemplo, especies de carnívoros con valores similares a los de especies herbívoras. Luego de someterlas a una secuencia de 20 lavados con ácido acético (pH 4.5), las muestras fósiles proporcionaron valores de Sr/Ca que colocaban a cada especie en su respectivo nivel trófico. El autor observó que a partir del décimo lavado la proporción Ca/P se acercaba al valor teórico de la masa (2.15) de acuerdo a la fórmula de la hidroxiapatita (ver más abajo). Quizás el tratamiento con ácido no logre restituir a sus niveles originales las concentraciones de los elementos de interés para la paleodieta, pero sí cuando menos lo suficiente como para revelar con precisión el tipo de dieta consumida y el nivel trófico ocupado en su hábitat por el vertebrado cuyos restos se analizan, lo que en última instancia es lo importante. Con el tiempo habrían de desarrollarse distintos procedimientos para aminorar los efectos de la diagénesis ósea.

En el subapartado *Mecanismos de diagénesis*, del presente Capítulo, quedó claro que ésta ocurre a través de procesos químicos y físicos. Dado que los primeros comprenden intercambio iónico, heteroiónico, recristalización, disolución y/o reprecipitación, sus efectos inciden de manera homogénea en todo el tejido óseo, modificando la composición química de la apatita biológica. La diagénesis física, en cambio, es de carácter no homogéneo, pues los elementos y minerales presentes en el suelo se depositan sobre la superficie del hueso, llenando sus cavidades, poros, y también los espacios creados por la descomposición de la materia orgánica (principalmente colágeno) del tejido. El método propuesto por Sillen (lavado de muestras con ácido acético) fue diseñado para contrarrestar exclusivamente el homogéneo enriquecimiento *postmortem* de carbonato y estroncio.

Por su parte, Lambert *et al.* (1989) establecieron un método para estimar y contrarrestar los efectos de la diagénesis no homogénea. El procedimiento consistió en remover, mediante abrasión física, entre 1-3 mm de la superficie externa de muestras de tejido compacto, incluyendo superficies de fractura y de cavidades medulares. La efectividad del método fue puesta a prueba en un total de 50 muestras de diáfisis de fémur, de sujetos adultos femeninos y masculinos. Cada muestra fue dividida en dos partes iguales. Una de ellas sometida a raspado mientras la otra no, para servir de control. En ambas se cuantificaron por absorción atómica los niveles de Al, Ba, Ca, Cd, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Pb, Sr y Zn. La selección del repertorio mencionado no sorprende, si tomamos en cuenta que Lambert y colaboradores han pugnado siempre por un enfoque multielementos en las investigaciones de paleodieta.

En las muestras sometidas a raspado, el análisis detectó importante disminución de K (37%), de Zn (40%), Al (56%), Mn (67%), Fe (72%), y un poco menor de Cd (21%). Los altos porcentajes registrados indican, por un lado, el notable carácter contaminante de los elementos sobre la superficie ósea, pues de ella se removió por abrasión entre 1-3 mm, y por el otro lado indican lo eficaz del método para contrarrestar la contaminación física.

Elementos como el Ba, Ca, Mg, Na y Sr no revelaron distinta concentración entre ambas mitades de cada muestra, prueba de que dichos elementos no fueron contaminantes de la superficie ósea. Esto último, a su vez, permite interpretarlo de dos formas: fueron elementos que contaminaron de manera uniforme a todo el hueso, de ahí que no se detectaran diferencias entre la mitad de muestra raspada y la que no lo fue, o los niveles registrados de elementos eran principalmente de origen biológico y sujetos a muy poca diagénesis.

Lambert *et al.* (1989: 435) concluyen señalando que los métodos de limpieza química y el de abrasión física, por ellos implementado, son complementarios y de necesaria aplicación para los estudios de paleodieta a partir del análisis de restos óseos humanos, pues mientras que la contaminación homogénea no puede ser tratada mediante abrasión física, ésta última remueve algunos de los contaminantes superficiales que la solución química no puede disolver.

Con el ánimo de proponer un consenso que llevara a estandarizar la metodología respecto al tratamiento de la diagénesis ósea en el ámbito de la paleodieta, cuatro métodos de limpieza, entonces utilizados previo al análisis químico de elementos, fueron aplicados por Lambert *et al.* (1990) a dos conjuntos óseos. En el primer conjunto, de procedencia arqueológica e integrado por tres muestras de diáfisis de fémur del sitio Middle Woodland Gibson (EUA) y otras seis de Estuquiña (Perú), los autores evaluarían la efectividad y limitantes de cada método para reducir los efectos de la diagénesis. En el otro conjunto, de hueso fresco e integrado por muestras pélvicas de ratón, el propósito fue averiguar si los métodos eran capaces de incidir también sobre los componentes biológicos del tejido óseo y, de suceder eso, en qué magnitud los modificaban. Esto era por demás importante, pues se buscaba que cualquiera de los procedimientos desarrollados redujera la contaminación diagenética pero sin menoscabo de la información biológica, traducida en la proporción relativa y variedad de elementos en el hueso fresco.

Aunque para esa época predominaba el interés hacia el estroncio, calcio y bario como indicadores tróficos, no cejaban los esfuerzos para dotar también a los estudios de paleodieta de una perspectiva basada en múltiples elementos. Por tal motivo, y por ser ellos

mismos defensores de dicha perspectiva, Lambert *et al.* (1990) cuantificaron además las concentraciones de magnesio, potasio, sodio y zinc, así como de aluminio, hierro y manganeso contaminantes metálicos presentes en el suelo. Debido a “interferencias” en sus mediciones, el bario quedó excluido de los resultados.

Todas las muestras fueron divididas en cuatro partes, para cada una ser sujeta a distinto método de limpieza. El método A consistió en lavar con agua destilada y cepillo a las muestras; el B significó retirar por medio de abrasión física entre 1-3 mm de las superficies óseas (externa, interna, de las fracturas, de todos los bordes), método comentado en párrafos anteriores; el C implicó lavar con una solución de ácido acético 1N (pH 2.5) a las muestras trituradas; en el D las muestras también trituradas fueron sometidas a una serie de siete a diez lavados con una solución moderadamente ácida (buffer de acetato, pH 4.5).

Dado que el método A conllevó mínimo procesamiento (sólo agua destilada y cepillo), los resultados de las muestras así tratadas sirvieron como parámetro para los que arrojaran los otros métodos. En el caso específico de los restos arqueológicos, Lambert y colaboradores reconocieron al método B (abrasión física) como el único que de manera consistente redujo en buena medida los niveles de aluminio, hierro y manganeso. Su efecto fue menor sobre el potasio y zinc, y mínimo para magnesio y sodio. Por tratarse de raspado de las superficies óseas, es claro que el carácter contaminante de los elementos estaría relacionado con la cantidad que de ellos fue eliminada. Vale la pena subrayar que ningún método afectó al calcio ni al estroncio. Los dos procedimientos químicos disminuyeron el nivel de magnesio y potasio, siendo el C por su mayor acidez (pH 2.5) el que lo hizo de forma sustancial. Mismo resultado tuvo sobre el sodio, mientras que el D lo elevó al ser parte de su buffer. Ninguno de los métodos químicos incidió sobre el zinc.

Lo antes dicho permite ver el trabajo complementario de los métodos, pues actúan de distinta manera. Por ejemplo, el B retirando la contaminación adherida a las superficies, mientras que los químicos lo hacen de manera homogénea en todo el hueso. Sin embargo, estos últimos modificaron también algunos componentes biológicos: el método C resultó muy agresivo al reducir de modo importante el nivel de magnesio, potasio y sodio, que sumado con el poco efecto hacia otros alteró la proporción de elementos en el tejido. Agresividad observada incluso en el hueso fresco (muestras de ratón), pues el método C redujo en 15% el nivel de sodio, en 50% el de magnesio y en 90% el de potasio. No afectó al aluminio, hierro y zinc. Las condiciones más moderadas de acidez del método D (pH 4.5) sólo incidieron en 25% sobre el potasio y zinc. Pese a ello los autores afirmaron que ese método no alteraba severamente la proporción biológica del conjunto de elementos.

Si bien los dos métodos químicos provocaron sensible reducción de algunos elementos en el hueso fresco, es muy importante destacar que ni siquiera el método C, cuya agresividad ya fue comentada, modificó los niveles biológicos de calcio ni estroncio en esas muestras. Lambert *et al.* (1990) concluyen reconociendo la eficacia del método C para conseguir el propósito al cual obedece, remover el carbonato diagenético, de modo que el restante en el tejido puede presumirse sea de origen biológico. Pero las drásticas modificaciones provocadas a diversos componentes químicos, tanto en restos arqueológicos y en frescos, invalidan a dicho método para ser utilizado en estudios de paleodieta desde una perspectiva de multielementos. Por ello para semejante enfoque los autores proponen que el tratamiento de las muestras óseas incluya la aplicación complementaria de los métodos B (eliminar por raspado 1-3 mm de las superficies) y el D (limitando los lavados a 3 o 5).

Sin duda el método C resultó ser el más severo de todos, y quizás por ello los autores no ofrecieron alternativa alguna para su aplicación, como puede ser la disminuir el tiempo que las muestras óseas permanecen sumergidas en la solución de ácido acético 1N. Cambio que lo convertiría en menos agresivo pero no por ello menos efectivo. Para estudios basados en el análisis de las relaciones Sr/Ca, el uso de ácido acético 1N durante la limpieza de muestras óseas sigue siendo una herramienta útil y eficaz.

La inquietud generada por la pérdida de importantes cantidades de elementos óseos a causa del método C y la respectiva recomendación para no usarlo, merecieron comentario por parte de Price *et al.* (1992), quienes señalaron lo injustificable tanto de una como de otra, pues el magnesio en particular, cuya baja fue sensible, es regulado metabólicamente y por ende su presencia *antemortem* en el tejido óseo no refleja los niveles de la dieta (ver comentario a Klepinger 1990, en el subapartado *Enfoque multielementos* del Capítulo I), regulación a la cual se hallan exentos el estroncio y bario. Además, al localizarse en la superficie de los cristales de hidroxiapatita y no en la estructura de ésta, el magnesio es más propenso a intercambio diagenético. Mediante la crítica a dicho elemento como posible marcador trófico, extensiva también para cualquier otro bajo control metabólico, como por ejemplo el zinc, Price *et al.* (1992) cuestionaban en realidad el enfoque multielementos de los análisis de paleodieta. Dichos investigadores reconocieron, sin embargo, valor discriminatorio sólo para el estroncio y bario, de ahí su interés por revisar los estudios recientes sobre la diagénesis de ambos alcalino térreos y de evaluar el procedimiento químico empleado para combatirla: el ácido acético 1N, que implementaron en dos modalidades, sea una secuencia de lavados o sumergiendo a las muestras en la solución durante una noche. A la postre las dos formas darían idénticos resultados.

De la revisión hecha por los autores ya se dio cuenta al final del subapartado *Reconociendo el problema*. Baste recordar aquí el menor efecto de la diagénesis sobre el estroncio, respecto al reportado para otros elementos, y que el principal mecanismo es su incorporación mas no su pérdida. En cuanto al empleo del ácido acético se refiere, Price *et al.* (1992) presentaron resultados de investigaciones propias donde fue medida la concentración de elementos disueltos en la solución durante la limpieza, al igual que los niveles en las muestras antes y después del tratamiento. Paso previo e indispensable fue el raspado de las superficies óseas, dada su eficacia para retirar parte de la diagénesis contaminante. Como parámetro a la utilidad del ácido emplearon dos criterios, el valor Ca/P teórico de la hidroxiapatita (2.15) y la separación trófica con base en las relaciones Sr/Ca., Ba/Sr de restos faunísticos y humanos.

Por lo general los investigadores detectaron valores más elevados de estroncio, bario y de Ca/P en las muestras antes de su limpieza química. Fenómeno registrado también para la solución de los primeros lavados, pero que paulatinamente disminuía en los últimos hasta alcanzar de manera constante el nivel biológico de Ca/P= 2.15. Al ocurrir eso, el análisis de las muestras óseas tratadas coincidía también con dicho valor, y los respectivos de Sr/Ca, Ba/Sr separaban a las especies de acuerdo con su lugar en la cadena trófica.

A pesar de los alentadores resultados, la cantidad de bario disminuía muy poco tras la limpieza química, lo cual hizo suponer que fue sujeto a mínima diagénesis, o que ésta sucedió mediante un mecanismo distinto, donde el ácido acético era incapaz de actuar para contrarrestarla. Esta última posibilidad volvía factible mayor contaminación de la estimada en principio, con todo y el éxito al separar a las especies. El bario se habría incorporado al hueso no por medio de su asociación con el carbonato, pues el ácido hubiera eliminado de

manera efectiva el exceso de ambos, sino a través de otros compuestos, en particular óxidos.

Conscientes de que en los suelos se hallan óxidos a base de aluminio, hierro y manganeso, Price *et al.* (1992) eligieron otras muestras óseas y después de su abrasión física las sometieron a un agente reductor: solución mitad ácido acético 1M y mitad hidroxilamine hidrocloreto ($H_2NOH.HCL$) 1M. Si bien los análisis evidenciaron el carácter biológico del bario presente en las muestras, dada su correlación directa con el estroncio pero no con el aluminio, hierro y manganeso cuyos óxidos se eliminaron, el agente reductor reportó niveles más bajos de bario que los obtenidos por medio del ácido acético 1N. De esa manera el agente mostraba ser útil para disolver óxidos contaminantes sobre los cuales no actuaban otros mecanismos de limpieza.

Price *et al.* (1992) ratificaron en las tres principales virtudes del ácido acético (restituir el valor teórico de Ca/P y en buena medida los biológicos de Sr y Ba), el promisorio futuro que desde los trabajos de Sillen (1989) se avizoraba para las investigaciones de paleodieta, pues hacían patente su viabilidad.

CAPÍTULO IV

DIETA Y RECURSOS ACUÁTICOS

A lo largo de la historia, las sociedades humanas se han adaptado a vivir bajo las condiciones medio ambientales más diversas, abarcando el espectro de ecosistemas del planeta. Por ello, ninguna estrategia de investigación, interesada en conocer las características de la subsistencia de los grupos humanos, estaría completa si no contemplara también el consumo de productos pertenecientes a ecosistemas acuáticos (lagos, ríos, estuarios, océanos). Los estudios de paleodieta por medio del análisis de elementos traza en el tejido óseo no fueron la excepción. En seguida serán revisados algunos ejemplos donde la evidencia arqueológica revelaba consumo de recursos marinos en variable grado, principal para unas sociedades o en complemento a recursos terrestres en otras. Esos ejemplos servirán para describir las polémicas, resultados y expectativas que sobre la materia ha generado el análisis de elementos traza. Al respecto se puede hablar de dos etapas, la primera tuvo como base el contenido absoluto de estroncio, y la segunda, a partir de los años 1990, la relación Ba/Sr.

Uso del estroncio y/o la relación Sr/Ca

Schoeninger y Peebles (1981) estudiaron el sitio Lu^o 25 localizado en el Valle Central de Tennessee, Estados Unidos. Rodeado de múltiples recursos terrestres y acuáticos (ríos), el sitio mostró larga ocupación humana (c. 3000 a.C.-1400 d.C.) aunque por grupos de dos periodos culturales distintos, y con economías de subsistencia también diferentes: caza-

recolección (periodo más antiguo), y agrícola. De acuerdo a la evidencia arqueológica, los grupos cazadores-recolectores aprovecharon fauna terrestre (venado, pequeños mamíferos, aves) y de río (tortugas, peces, caracoles y moluscos). Si bien los moluscos representaron proporción menor en la subsistencia, fue un recurso consumido estacionalmente cuando otros escaseaban. Con el tiempo, conforme los grupos agrícolas se asentaban en el valle, desplazando a los cazadores-recolectores, el sitio atestiguó otra práctica de subsistencia basada ahora en el cultivo de maíz, frijol y calabaza, complementada de otros recursos silvestres. El análisis de la frecuencia de restos faunísticos reveló en el sitio una diferencia importante entre ambas economías: los grupos agrícolas no consumieron moluscos, a pesar de que dicho recurso seguía disponible en el medio ambiente.

Sabedores de la alta cantidad de estroncio concentrada en el tejido blando de los moluscos, el panorama arqueológico antes descrito permitió a los autores evaluar dos cosas: *a)* en qué medida el consumo de moluscos (y por añadidura de cualquier otro alimento animal de características similares) eleva el nivel de estroncio en el hueso humano, y *b)* si ese aumento era de tal magnitud como para modificar, a su vez, la supuesta posición trófica que debiera corresponder al grupo (cazadores → cazadores-recolectores → agricultores, era el sentido en el cual se creía aumentaba el nivel de estroncio). Pionero en su tiempo, el trabajo de Schoeninger y Peebles (1981) tuvo por objetivo principal demostrar la invalidez de ese *continuum* trófico, que predominaba en el pensamiento de la época, pero con el cual mostraban desacuerdo por simplista.

En virtud de sus propósitos se entiende el tamaño reducido de la muestra (seis individuos) estudiada por los autores, no obstante en el sitio Lu° 25 fueran recuperados

1025 entierros cuya inmensa mayoría pudo asignarse a uno u otro periodo de ocupación. El estudio incluyó sólo sujetos adultos, la mitad de ellos (3) pertenecientes al periodo de caza-recolección y la otra mitad al agrícola. Cada submuestra quedó integrada por dos individuos masculinos y uno femenino. Sin explicar los criterios que apoyaron tal decisión, los autores eligieron fragmentos de costilla para el análisis químico. Éste cuantificó exclusivamente el valor absoluto de estroncio y no la relación Sr/Ca. El nivel de bario no fue considerado porque en ese tiempo su utilidad no era aún reconocida.

Tal y como los autores habían previsto, los resultados mostraron en el sitio Lu° 25 un “mundo al revés”, donde las mayores concentraciones de estroncio eran propias no de los individuos agrícolas (media 295, por absorción atómica) sino de los cazadores-recolectores (media 465 a.a.), siendo la diferencia casi 1.8 veces. Tras descartar a la diagénesis como causa de tal diferencia, los autores la atribuyeron al cambio de dieta.

El carácter *sui generis* de la investigación de Schoeninger y Peebles (un mismo sitio, dos tipos de subsistencia, consumo de moluscos en una pero no en otra, e inversión de papeles tróficos), mostró con nitidez que los estudios de paleodieta implicaban mayor complejidad de la que se creía, y por otro lado la necesidad de contar con un conocimiento previo de las sociedades bajo estudio, cuando menos en lo que toca al rango de recursos por ellas aprovechado. La vanguardista técnica de análisis químico óseo no substituía en modo alguno a los tradicionales estudios arqueozoológicos, más bien los complementaba. El criterio fundamental para Schoeninger y Peebles fue la alta concentración de estroncio de los moluscos, traducida a su vez en elevado nivel de estroncio en la estructura esquelética de los seres humanos que los consumieron de forma habitual. Sin embargo, como veremos, dicho criterio sería puesto en duda, y a la postre rechazado.

Con el objetivo de respaldar sus investigaciones de paleodieta de los grupos cazadores recolectores de Southwestern Cape, Sudáfrica, Sealy y Sillen (1988) realizaron un estudio a largo plazo sobre la transferencia de Sr y Ca en ecosistemas modernos de la región. Cabe recordar que los resultados del medio terrestre ya fueron comentados en el subapartado *Variabilidad en ecosistemas modernos* del Capítulo II. Por su parte, el análisis del tejido comestible de la fauna marina reveló un amplio rango de variabilidad Sr/Ca de 1.0 a 15.8, valores que se traslapan a los registrados para los organismos terrestres, sea flora (1.9 a 11.1) o fauna (1.0 a 11.1). Por tanto, afirman Sealy y Sillen (1988: 429-435) el consumo de recursos marinos no eleva de manera sustancial los niveles de estroncio y, peor aún, la relación Sr/Ca no es útil para discriminar entre organismos marinos y terrestres. Por añadidura tampoco lo es para distinguir grupos humanos cuya paleodieta se basara en el consumo de alimentos marinos. Sus conclusiones refutaban las de Schoeninger y Peebles (1981) quienes, como se recordará, analizaron entierros del sitio Lu° 25 (EUA) localizados en depósitos donde abundaban conchas de moluscos.

Sealy y Sillen (1988) consideraron que las bajas concentraciones por ellos cuantificadas para la moderna fauna marina sudafricana, que incluyó especies similares a las que integraron la dieta de los cazadores-recolectores según la evidencia arqueológica, no provocaría elevados niveles de Sr/Ca en el tejido óseo de los seres humanos consumidores de tales recursos. La diagénesis, en cambio, podía hacerlo y pudo ser la razón de los altos niveles reportados por sus colegas en el sitio Lu° 25. Para comprobar esa hipótesis, Sealy y Sillen analizaron muestras óseas de dos antiguos cazadores-recolectores, habitantes de la región sudafricana base de su estudio, localizados en depósitos con abundante concha de molusco, contexto similar al de los restos humanos del sitio Lu° 25.

Las muestras fueron sometidas a un procedimiento de limpieza desarrollado por Sillen al cual nombró “Perfil de Solubilidad”, que consiste en una serie sucesiva de 20 lavados con una solución de ácido acético/sodium acetate bufer y de pH 4.5. La solución decantada de cada lavado se analiza químicamente, y el conjunto de los veinte resultados ofrecen el respectivo perfil de solubilidad: al inicio, el proceso elimina de la muestra ósea el estroncio más soluble, más superficial, de origen diagénético, lo que se traduce en elevados niveles del elemento en la solución decantada, si bien la tendencia es a la baja conforme avanza el proceso. Ya durante los últimos lavados se comienza a retirar de la muestra ósea el estroncio menos soluble, entonces se observan reducidos y estables niveles de estroncio en la solución, indicio de que el tejido óseo se aproximaría más a los niveles *antemortem* y por ende biogénicos de estroncio.

El perfil de solubilidad registrado por Sealy y Sillen (1988: 434-435) para los restos humanos de Sudáfrica puso en evidencia el importante efecto de la diagénesis, que actuó equiparando el contenido de estroncio de los restos humanos al de las conchas de moluscos a ellos asociadas y que se distinguen por sus altos niveles de estroncio, siendo 1180 ppm el promedio para las tres especies sudafricanas más comunes. Dada la similitud en los contextos de enterramiento, la misma explicación cobraba sentido también para el sitio norteamericano de Lu° 25: ahí el nivel de estroncio de las muestras humanas analizadas por Schoeninger y Peebles (1981) midió el efecto de la diagénesis, mas no el de una paleodieta basada en recursos del mar.

Además del proceso referido, debe tomarse en cuenta que el motivo de considerar a los moluscos como organismos concentradores de estroncio, opinión predominante hasta fines de la década de los años 80's del siglo XX, se basaba en estudios que habían

cuantificado las concentraciones del isótopo radioactivo ^{90}Sr y no del elemento estable, siendo el primero en efecto mucho más abundante y variable en los organismos. Por tal motivo, Sealy y Sillen (1988) consideraron necesario que las futuras investigaciones de paleodieta estimaran los niveles del elemento estable y no de alguno de sus isótopos.

El traslape de los niveles de estroncio y de Sr/Ca entre organismos terrestres y marinos, registrado por Sealy y Sillen (1988), arrojó serias dudas sobre el uso de ambos criterios para distinguir grupos humanos cuya paleodieta se basara en el consumo de alimentos marinos, pues estos últimos no generan alto nivel de estroncio en el tejido óseo. A la postre no habría un reanálisis de los restos humanos del sitio Lu° 25, para evaluar, mediante el Perfil de Solubilidad de nuevas muestras, el impacto de la diagénesis. Pero en cambio la investigación de elementos traza en ecosistemas modernos de Sudáfrica prosiguió. Antes de revisar esos importantes resultados, y en aras de respetar el orden cronológico, será necesario detenerse primero en la crucial incorporación de otro alcalino térreo, el bario, a los estudios para reconocer un componente marino en la subsistencia.

El bario y la relación Ba/Sr

Para efectos de la investigación sobre dieta antigua, el bario (Ba) comparte dos propiedades con el estroncio que lo vuelven de utilidad: *a)* es un elemento traza no esencial contenido en la dieta, que en los vertebrados se deposita casi por completo en la fase inorgánica (hidroxiapatita) del tejido óseo, donde es capaz de sustituir al calcio; *b)* opera en contra suya un proceso de discriminación biológica para favorecer la absorción del calcio.

Sin embargo, a diferencia de lo ocurrido con el estroncio, es más severo el proceso que afecta al bario pues inicia no con los consumidores primarios (herbívoros), sino desde

el primer nivel de la cadena alimenticia, con los productores primarios (vegetales). Así, en un ecosistema dado, las plantas mostrarán equilibrio de sus niveles de estroncio y calcio con respecto al suelo ($Sr/Ca = 1$), pero no de bario que será siempre menor ($Ba/Sr < 1$; $Ba/Ca < 1$). Tales diferencias aumentan sobremanera, afectando también al estroncio, con los vertebrados, pues su tracto digestivo absorbe en proporciones de 10:5:1 al calcio, estroncio, y bario respectivamente. Repetido su ejercicio conforme se asciende en la cadena alimenticia, dicha proporción dará como resultado que el tejido óseo de los carnívoros, entre los habitantes del mismo ecosistema, contenga los niveles más bajos de estroncio y más aún los de bario.

Este hecho ha dado pie para considerar al bario como el elemento que mejor identifica la posición trófica de los organismos. Ello de ningún modo demerita la respectiva eficacia del estroncio, cuyo proceso de discriminación fue primero reconocido. Tan es así que la generalidad de estudios sobre paleodieta en sociedades humanas por análisis de elementos traza, emplea como parámetro comparativo la relación Sr/Ca en hueso para reconocer la cantidad relativa de recursos vegetales/animales consumidos por los individuos. Sin embargo, dicho parámetro adolece de una salvedad: es relativamente efectivo siempre y cuando los bienes que integran la dieta procedan de ecosistemas terrestres, pero no es útil cuando ésta incluye recursos acuáticos (marinos, lacustres, etc.). Es justo ahí donde radica la enorme importancia del bario.

Aunque la distribución de minerales sobre la superficie terrestre varía entre áreas geográficas, ellas presentan igualdad en las respectivas relaciones Sr/Ca , Sr/Ba , y Ba/Ca , siendo 1 el valor para cada una de éstas. El panorama es muy distinto para el agua de mar, pues su relación Ba/Sr es < 0.001 . Por ejemplo, Schroeder *et al.* (1972: 491, 508) reportan 8

ppm de estroncio y entre 0.03 a 0.006 ppm de bario. Valores tan extremos obedecen a la reacción química ocurrida bajo condiciones naturales entre el bario y el sulfato, un compuesto muy abundante en el agua de mar. El sulfato de bario (BaSO_4) o barita resultante es insoluble. La abundancia de sulfato y lo insoluble de la barita tienen por efecto “sustraer” del medio líquido al bario. De forma paralela, y sin ser afectado por fenómeno parecido, el estroncio permanece libre y en cantidad significativamente mayor. Esto incide en el movimiento de los elementos traza al interior de las cadenas tróficas marinas, pues los organismos que las integran también discriminan en contra del estroncio y bario. Dado que ambos ingresan a las cadenas en condiciones tan disímiles de concentración, y tras los procesos de discriminación biológica, es evidente que la diferencia en el contenido de estroncio y bario en el tejido animal se habrá incrementado de manera notable siendo la relación Ba/Sr todavía más baja a la de el agua marina (0.001). Esos niveles no tienen paralelo entre vertebrados de cualquier ecosistema terrestre, con todo y biopurificación del calcio. Así, en teoría, un grupo humano cuya subsistencia dependa en buena medida de recursos marinos, habrá generado elevados niveles de estroncio, respecto a los extremadamente bajos de bario, en el esqueleto de sus integrantes. Si esos valores se comparan por separado para cada elemento con los correspondientes a otro grupo que basó su subsistencia en recursos terrestres, se observaría que: $\text{Sr}_{(\text{MAR})} > \text{Sr}_{(\text{TER})}$ pero $\text{Ba}_{(\text{MAR})} < \text{Ba}_{(\text{TER})}$. Una dieta marina podría reconocerse por concentraciones extremas de ambos elementos traza.

Con el objetivo de poner en práctica la relación Ba/Sr como herramienta para distinguir el consumo de productos marinos en la dieta de sociedades antiguas, Burton y Price (1990)

llevaron a cabo un estudio comparativo entre restos humanos, de sitios cuya información arqueológica permitiera clasificarlos en uno de tres tipos: *a*) sin acceso a recursos marinos, sitios tierra adentro (6), *b*) costeros, donde los productos de mar dominaron la dieta (6), y *c*) costeros, pero con subsistencia basada en la agricultura (2). Elegidos en su mayor parte de la geografía estadounidense, otros cuatro sitios proceden de Mesoamérica: Fábrica San José y Monte Albán, considerados por los autores como sin acceso a recursos marinos; Río Viejo y Cerro de la Cruz, clasificados a su vez como costeros con dieta agrícola.

En parte gracias a los autores, para cuando ellos realizan el estudio, la paleodieta por elementos traza ya disfrutaba de cierta estandarización en los procedimientos empleados para aminorar y evaluar el efecto de la diagénesis ósea (limpieza de las muestras óseas con ácido acético, medición de elementos químicos comunes en el suelo y contaminantes del hueso, medición de la integridad químico-estructural del tejido), descritos en el Capítulo III Diagénesis del Tejido Óseo. Sometidas a esos procedimientos, de las 171 muestras analizadas, sin embargo, ninguna información sobre número de entierro, tipo de hueso, edad y sexo de los individuos es consignada por Burton y Price. El sitio mesoamericano de muestra más numerosa fue Cerro de la Cruz, con 12 individuos, y Monte Albán el de menor con 3. Los sitios estadounidenses y uno peruano (Paloma) quedaron por lo general mejor representados.

El análisis de la relación Ba/Sr separó a los sitios en dos grupos claramente definidos. Los valores entre ambos fueron tan opuestos que muy lejos estuvieron de siquiera aproximarse, con todo y la desviación standard para cada sitio, sujeta a las características de su muestra (tamaño, quizás también su carácter heterogéneo: tipo de hueso, sexo y edad de los individuos). Tratándose de registros tan pequeños y para evitar el uso de exponentes de

base 10, los autores presentaron sus resultados como $\log(\text{Ba/Sr})$. Aquellos sitios sin acceso a recursos marinos tuvieron, en conjunto, una media para el $\log(\text{Ba/Sr}) = -0.18 (\pm 0.18)$; la de los sitios costeros pero dieta a base de recursos terrestres fue $\log(\text{Ba/Sr}) = -0.25 (\pm 0.16)$, es decir, un valor cercano al primero; mientras que la media para los sitios costeros con dieta predominantemente marina fue $\log(\text{Ba/Sr}) = -1.56 (\pm 0.19)$, cifra muy distinta a las anteriores.

La correspondencia entre los resultados del análisis químico con el tipo de subsistencia inferido a partir de información arqueológica, significó demostrar, en otros sitios, la validez de la relación Ba/Sr para identificar dieta marina/dieta terrestre. Sobre esa base, los autores decidieron averiguar si el método era capaz de distinguir, también, matices en el consumo de recursos marinos entre sociedades que tuvieran en común el mismo tipo de dieta predominante. Dicho de otro modo, cuál de los grupos “marinos” dependió *más* de tales recursos; cuál de los grupos con economía “terrestre” incorporó *más* productos marinos. Para el primer caso, de los sitios incluidos en el estudio, Burton y Price se concentraron en los resultados de cinco, todos ubicados en Alaska. Los autores observaron un mismo fenómeno entre los sitios que compartieron proximidad geográfica: sus valores $\log(\text{Ba/Sr})$ indicaban distinto grado de dependencia de productos marinos. Fenómeno respaldado en análisis de isótopos, realizados de modo independiente por otro investigador.

Si bien para esos ejemplos específicos la relación Ba/Sr mostró ser útil también a semejante nivel de diferencia en dietas marinas, los autores manifestaron escepticismo de que tales matices pudieran percibirse entre economías “terrestres”. Aquí su razonamiento:

“...Un problema es que relativamente grandes diferencias en la dieta deberían tener poco efecto en la relación Ba/Sr en poblaciones con dietas

predominantemente terrestres. Por ejemplo, la introducción de 10% de plantas terrestres en una dieta marina puede elevar el bario de la dieta en un orden de magnitud, pero 10% de recursos marinos introducidos a una dieta terrestre reducirá el nivel de bario sólo en aproximadamente 10%...el método puede no ser aplicable para la determinación de pequeñas cantidades de recursos marinos en una dieta predominantemente terrestre.” (Burton y Price, 1990: 551, traducción mía).

Es claro que detrás de los porcentajes referidos se encuentran las distintas concentraciones de estroncio y bario característicos de los recursos de uno u otro origen. Como se indicó ya en párrafos anteriores, las plantas poseen niveles de bario casi en equilibrio con los de estroncio y del suelo donde crecen, nivel incomparablemente mayor al que priva en los ecosistemas marinos. Así, a una subsistencia con base en dichos ecosistemas le bastan cantidades relativamente pequeñas (“10%”) de vegetales para elevar de forma notable la cantidad de bario en el hueso. Pero cuando se invierte el peso relativo de cada tipo de alimento en la dieta, el efecto en el hueso es casi imperceptible: a las altas concentraciones de bario de la alimentación dominada por vegetales, se le “retiran” apenas ínfimas cantidades (“10%”) del elemento, al consumir en baja proporción productos marinos. El panorama cambia cuando éstos últimos ocupan mayor proporción, a costa de los vegetales, en la dieta.

Quizás con la anterior explicación de por medio pueda percibirse mejor la paradoja presente en la cita de los autores: en términos de la bioquímica ósea (elementos traza) no todos los cambios significativos se traducen del mismo modo en términos culturales, de organización social. Sociedades “marinas” siguen teniendo el mismo tipo de economía y organizándose del modo que lo han hecho siempre para aprovechar su entorno, aunque de

él tomen también recursos terrestres en baja cantidad y el esqueleto de los individuos contenga por ello cantidades altas de bario.

Por último, no está de más recordar que el escepticismo expresado por los autores, y las reflexiones a que da pie, no invalidan la utilidad de la relación Ba/Sr como indicador trófico, pero en todo caso serían consideraciones a tomar en cuenta cuando se busca identificar matices en el uso de recursos marinos por parte de las sociedades pretéritas.

Con el antecedente del importante trabajo de Burton y Price (1990), Gilbert *et al.* (1994) prosiguieron sus propias investigaciones sobre la distribución de elementos traza en cadenas alimenticias modernas (terrestres y marinas) de Southwestern Cape, Sudáfrica, ya comentadas líneas arriba (ver Sealy y Sillen, 1988). A la distribución de Sr, y Ca agregaron también la de Ba, poniendo particular interés en evaluar la relación Ba/Sr como parámetro para distinguir entre dieta terrestre/marina, de acuerdo a lo planteado por Burton y Price (1990). Ejemplares de las especies modernas de flora y fauna consumida por las antiguas poblaciones humanas, de acuerdo al registro arqueológico, fueron recolectadas por los autores y sometidas a análisis químico. De la fauna se analizó por separado el tejido óseo y el muscular.

Los resultados dejan ver con nitidez que la fauna marina presenta rangos muy altos de Sr/Ca respecto a los de Ba/Sr, y por ende los de Ba/Sr se mantienen bajos ($\log = 0.00-0.06$). Lo anterior aplica para las muestras de hueso y de tejido blando. Esos reducidos rangos de Ba/Sr lo siguen siendo cuando se les compara a los de la fauna terrestre, sea hueso o tejido blando, ($\log = 0.31-1.60$) (Gilbert *et al.*, 1994: 174-175). De lo anterior se pueden formular dos conclusiones. Primera, los niveles de Sr y Ba en el medio marino (agua) son opuestos, lo cual se refleja en la fauna. Segunda, al comparar ecosistemas, las relaciones Ba/Sr y

Ba/Ca son consistentes para diferenciar muestras marinas de terrestres, sean de hueso o tejido blando. Ambas conclusiones en concordancia a lo consignado por el trabajo previo de Burton y Price (1990). Es muy importante destacar que si la relación Br/Sr funcionó, fue debido a las en extremo reducidas concentraciones de bario que distinguen al agua y organismos marinos, y no por el estroncio, cuyos niveles entre los organismos de uno y otro ecosistema se traslapan.

En el caso de la flora marina hubo sin embargo una excepción, pues Gilbert *et al.* (1994) registraron una especie caracterizada por su elevado nivel de Ba/Ca. De ahí deducen que los peces consumidores de ella tendrían mayor Ba/Ca al resto de la fauna de ese ecosistema y, en última instancia, los grupos humanos que incluyeran en su menú habitual a dichos peces mostrarían valores óseos de Ba/Ca más parecidos a los de cadenas alimenticias terrestres, perdiéndose así, desde la perspectiva de los elementos traza, el componente marino y las características originales de la subsistencia de los individuos. Aunque posible, vale la pena aclarar que ninguno de los vertebrados acuáticos analizados por Gilbert *et al.* (1994) fue un cercano prospecto para semejante escenario.

Una vez evaluada la distribución de estroncio, bario y calcio en ecosistemas de Southwestern Cape, Sudáfrica, el bario se destacó por diferenciar sin ambigüedad alguna organismos marinos de terrestres. Esa característica fue puesta a prueba por los autores en una muestra arqueológica local de nueve esqueletos humanos, con el propósito de reconocer consumo de recursos marinos como parte de la paleodieta. Siete de los sujetos habitaron regiones costeras y otros dos tierra adentro. Todos disponían ya de un estudio previo de paleodieta mediante la técnica de isótopos.

De los nueve individuos sólo uno tuvo niveles muy bajos de Ba/Ca (0.018) y Ba/Sr (0.012), indicio de una dieta dominada por recursos del mar, lo cual era acorde a su resultado de isótopos. Dos sujetos tuvieron los valores más elevados de Ba/Ca (0.114, 0.095) y Ba/Sr (0.103, 0.088), síntoma de una dieta basada en recursos terrestres, también confirmada por el análisis de isótopos. Ahora bien, de acuerdo con el estudio de elementos traza, el resto de los individuos (6) se distribuyó en un rango intermedio al de los casos antes mencionados, lo cual indicaría un consumo más equilibrado de alimentos de uno y otro origen. En términos generales tal interpretación fue corroborada por el estudio de isótopos, pero, y ahí lo importante, ambas técnicas de análisis químico discreparon respecto al peso relativo de los recursos marinos y terrestres en las dietas. Así por ejemplo, dos individuos cuyo registro de ^{13}C fue tan distinto (-12.6‰ y -16‰), el primero con mayor ingesta de productos del mar y el segundo de terrestres, presentaron resultados similares de Ba/Sr (0.026 y 0.022 respectivamente). La discordancia entre técnicas llevó a sugerir a Gilbert *et al.* (1994: 181-183) que el análisis de elementos traza no detecta, como sí lo hace el de isótopos, diferencias sutiles en el consumo de recursos marinos/terrestres.

No obstante que las investigaciones de Sealy y Sillen (1988) y Gilbert *et al.* (1994) cuestionaban seriamente la utilidad de la relación Sr/Ca para discriminar entre dieta terrestre/marina, Burton y Price (1999) percibieron que dichos estudios no habían permeado lo suficiente en la comunidad arqueológica, donde aún gozaba de respaldo el supuesto de que una subsistencia a base de recursos marinos provocaba elevados niveles de Sr en el tejido óseo, muy diferentes a los registrados en ecosistemas terrestres.

Para zanjar en definitiva la controversia, ambos autores decidieron comparar el contenido de Sr y Ca de cadenas alimenticias modernas (terrestres y marinas) y el de restos humanos de sociedades pretéritas cuya subsistencia se basó en los recursos del mar, según lo demostrara la información arqueológica y/o arqueométrica (isótopos, nivel de Ba del tejido óseo). Los autores contrastaron sus resultados de la fauna con los ya publicados en la literatura, si bien para el ecosistema terrestre tomaron como referencia el estudio de Elias *et al.* (1982). Los restos humanos analizados se eligieron de varios sitios de Alaska, EUA, y de La Paloma, Perú. No hubo mención del total de individuos ni de su género y sexo. Diáfisis de hueso largo se eligió para el muestreo.

En suma, Burton y Price (1999) concluyeron que: el agua de mar, en efecto, posee elevados niveles de Sr ($\log(\text{Sr}/\text{Ca}) = -0.862$), sin embargo en el ecosistema marino ocurre, igual que en el terrestre, un proceso de biopurificación del calcio conforme se asciende en la cadena alimenticia, algo ya observado por Gilbert *et al.* (1994). Dicho proceso es responsable de la sensible disminución de estroncio en los vertebrados marinos (cuyo rango $\log(\text{Sr}/\text{Ca})$ va de -1.859 a -3.152) con respecto al agua de mar. Los valores Sr/Ca de la fauna marina no se distinguen de los de la flora y fauna terrestres, y tanto en uno como en otro ecosistema los niveles más bajos ($\log(\text{Sr}/\text{Ca}) = -3.0$) correspondieron a los animales ubicados en la cima de la pirámide alimenticia (carnívoros para el terrestre, mamíferos para el marino). En los restos humanos no se registró alto contenido de estroncio, sino más bien reducido ($\log(\text{Sr}/\text{Ca}) = -3.0$), similar al de los organismos antes referidos, por consiguiente el nivel de Sr y la relación Sr/Ca deben descartarse ya como parámetros para identificar en las antiguas poblaciones humanas una subsistencia que incluyera alimentos del mar.

Sin duda a primera vista desalentador, el balance de las investigaciones de Sealy y Sillen (1988), Gilbert *et al.* (1994), pero de manera especial de la de Burton y Price (1999), fue en realidad positivo: la controversia respecto al uso del contenido de estroncio y de la relación Sr/Ca para los fines antes mencionados se consideró en lo sucesivo un caso cerrado, mientras que al mismo tiempo se definió con firmeza un consenso a favor del bario, y en particular del nivel Ba/Sr del tejido óseo, hoy día el único criterio válido para identificar paleodieta marina mediante el análisis de elementos traza. Después de todo, como con ironía terminan Burton y Price (1999), si el estroncio y la relación Sr/Ca “habían fallado”, era una excelente noticia, pues demostraban reflejar los niveles de la dieta, que cuando comprende productos marinos no se caracteriza por altas concentraciones de estroncio.

Erigida en el único criterio válido, eso de ningún modo significaba para la relación Ba/Sr ser infalible. Baste recordar las dificultades planteadas por Burton y Price (1990) para reconocer matices en el consumo de productos marinos, y no tanto para identificar los extremos: subsistencia basada en o sin consumo de ellos. Mismos problemas que enfrentaron Gilbert *et al.* (1994) en restos humanos de Sudáfrica descritos en párrafos anteriores.

Valdrá la pena hacer ahora un primer balance de lo dicho en éste y en los capítulos previos, recurriendo para ello a un ejemplo por demás ilustrativo. La variabilidad Sr/Ca en los distintos peldaños de las pirámides alimenticias, un hecho corroborado por estudios de fauna moderna y arqueológica, planteaba nuevas interrogantes para las investigaciones de paleodieta humana, debido al carácter diverso de ésta: consumo en variable grado de

recursos marinos y/o terrestres (vertebrados, plantas). En última instancia, qué pesaba más sobre la relación Sr/Ca de la dieta y del tejido óseo, ¿la proporción en la cual cada alimento fue consumido, o el contenido mineral (Sr, Ca) que cada uno aportaba a la dieta? Burton y Wright (1995) señalaron que el punto de vista tradicional se inclinaba por la cantidad de alimento: a mayor consumo de carne y menor el de plantas, menores los valores Sr/Ca en el tejido óseo de los individuos. Se presuponía por consiguiente una relación lineal entre consumo y contenido de Sr/Ca en dieta y esqueleto.

Los autores rechazaron ese enfoque, justificaban su diferendo al plantear el hipotético caso de dos carnívoros, que a lo largo de su existencia consumieran únicamente la misma especie de presa, aunque en distinta cantidad. Pese a la diferencia, ambos felinos tendrían idénticos valores Sr/Ca en hueso, debido a que en ambos operaría de igual forma el proceso de biopurificación del calcio, indicando entonces la relación Sr/Ca posición trófica y no cantidad de presas consumidas. Si en tales situaciones extremas, donde la dieta la integra un solo componente, no ocurre la supuesta relación lineal antes referida, menos aun en dietas más complejas donde predomina, además, la variabilidad Sr/Ca de los alimentos que la integran. De hecho en esos casos se vería comprometida incluso la propia separación trófica.

Burton y Wright (1995) estudiaron de qué manera interactúa la composición mineral de los recursos consumidos, y cuál era el aporte de cada uno en la relación Sr/Ca de la dieta en su conjunto. Para ese fin emplearon una perspectiva teórica, nombrada por ellos *Quantitative Modeling*, basada en dos consideraciones centrales: a) una constante de carácter fisiológico, resultado de múltiples investigaciones biomédicas, según la cual, en promedio, el 20% de estroncio es absorbido por el tracto digestivo, luego incorporado al

torrente sanguíneo y casi la totalidad de ese porcentaje se deposita en la fase mineral del tejido óseo, donde ocupa la misma posición que el calcio; *b*) sin embargo, la cantidad de estroncio en el hueso no está en proporción directa con la cantidad total del elemento incluida en la dieta, pues el proceso de biopurificación asimila de manera preferente al calcio. El estroncio depende de la cantidad de calcio.

Al articular ambas consideraciones, los autores concluyen que el parámetro a evaluar no son las cantidades absolutas de uno u otro mineral, sino su relación (Sr/Ca). Deducen entonces que $(\text{Sr/Ca})_{\text{HUESO}} \approx (0.2)(\text{Sr/Ca})_{\text{DIETA}}$. Aunque a simple vista lo anterior pudiera parecer un par de obviedades, en realidad son todo lo contrario. Por un lado reafirman el sentido de la relación Sr/Ca como el parámetro a tomar en cuenta, y por otro lado destacan al calcio como el elemento que domina la relación, y no los valores absolutos de estroncio, debido a la preferencia que le otorga el proceso de biopurificación. Poco importa, en primera instancia, si un alimento posee elevados niveles de estroncio, pues ello no necesariamente se reflejaría en el metabolismo óseo si además ese o cualquier otro de los alimentos cuenta con altos niveles de calcio. Este último se absorbería primero y luego los otros elementos traza según el orden de similitud química con el calcio, capaces por tal razón de sustituirlo en la fase mineral del hueso: (Sr, Ba, Pb). De esa manera $(\text{Sr/Ca})_{\text{DIETA}} = \sum_i (\text{Sr/Ca})_i (\% \text{ del total de Ca})_i$ donde “i” es la suma para cada componente de la dieta.

De la fórmula anterior se deduce que alimentos con altos contenidos de calcio contribuyen en mayor proporción a los valores Sr/Ca de la dieta y del hueso, mientras que aquellos otros con bajo nivel de calcio tienen poco efecto, al grado incluso de pasar desapercibidos o "invisibles". La perspectiva teórica de Burton y Wright (1995),

Quantitative Modeling, aplica la fórmula a dietas hipotéticas de las cuales se conocen el valor real Sr/Ca de sus componentes y la proporción de ellos consumida. Las “dietas” analizadas se integraron con variables porcentajes de unos pocos alimentos (maíz, frijol, carne), pero suficientes para demostrar con elocuencia lo complejo que resulta inferir paleodieta con base en la relación Sr/Ca del tejido óseo.

Los autores observaron que el maíz, característico por su bajo contenido de calcio (14 ppm) y estroncio (0.1 ppm), no tiene efecto alguno sobre la relación Sr/Ca de la dieta cuando ésta incluye productos de alto contenido mineral (por ejemplo el frijol, Ca= 1000 ppm, Sr= 6.6; la carne, Ca= 95, Sr= 0.233) quienes dominan en la relación. El maíz puede representar distinto porcentaje de la subsistencia y aun así no modificar el valor Sr/Ca de ella. En términos de los elementos traza el maíz se pierde, se hace invisible, no existe evidencia de su consumo, excepto claro cuando constituye el 100% de la dieta. Ahora bien, si alimentos de alto contenido mineral se incorporan incluso en reducido porcentaje, su efecto es inmediato, pues llevan el valor Sr/Ca de la dieta al propio, volviendo entonces “invisibles” a otros alimentos.

Aunque por sí mismo el maíz ofrece muy poco mineral, la forma en que distintas culturas lo procesan puede incrementar notablemente el contenido mineral relacionado con su consumo, a grado tal que incluso predomine en la relación Sr/Ca de la dieta, aunque represente apenas un pequeño porcentaje de ella. Tal cambio no obedece en sentido estricto al cereal, pues conserva inalteradas sus propiedades, sino a los ingredientes con los cuales se combina durante su procesamiento. Burton y Wright (1995: 279) destacan el ejemplo del grupo Hopi, en los Estados Unidos, que tiene por costumbre agregar a la harina de maíz

ceniza de una planta específica. Así, de tener 14 ppm de calcio y 0.1 ppm de estroncio, el maíz procesado alcanza 5,680 y 48 ppm respectivamente.

En suma, el enfoque teórico empleado por Burton y Wright (1995) dejó para los estudios de paleodieta de las poblaciones humanas una pésima noticia, bajo la forma de una contundente ironía: En efecto, la relación Sr/Ca del tejido óseo es un fiel parámetro del relativo a la dieta, *pero no indica la proporción de plantas/carne consumida de manera habitual por los individuos, sino al alimento de mayor contenido de calcio sin importar el porcentaje que dicho alimento ocupó en la subsistencia*. Siguiendo en la misma vertiente teórica, años más tarde Burton y Price (2000: 166) afirmarían respecto al fracaso para identificar cantidades relativas de consumo de carne a través de los valores óseos de Sr/Ca: “la decepción no obedece a falla alguna del estroncio para reflejar dieta, sino a una injustificada expectativa de que el estroncio del tejido óseo deba necesariamente reflejar consumo de carne” (traducción mía).

Claro, era necesario conocer si esas conclusiones derivadas de la “teoría” encontraban su correspondiente en la “realidad”, es decir, en investigaciones de caso. Un buen ejemplo es el estudio de paleodieta realizado por Ezzo *et. al.* (1995) en el área de Georgia Bight, EUA. El área consta de una serie de islas rodeadas de pantanos, y próximas a un sistema de estuarios que se extienden desde Carolina del Norte hasta la Florida. Los antiguos pobladores gozaron de abundantes y diversos recursos naturales.

Debido a que la ocupación humana sobre las islas fue prolongada, quedó constancia arqueológica e histórica de los cambios económicos y de subsistencia experimentados por las sociedades, desde tiempos de la caza-recolección hasta tiempos de la colonia española. Investigaciones de los restos humanos, entre ellas de isótopos estables y paleopatología

(incidencia de caries); de los restos faunísticos y de la flora; así como de las fuentes etnohistóricas, habían contribuido a describir el panorama de la subsistencia antigua en la región. Los datos indicaban que los grupos cazadores-recolectores-pescadores, del periodo preagrícola (1000 a.C.–1150 d.C.) tenían como base los recursos marinos, complementados con la flora y fauna terrestres. Con la adopción de la agricultura, fenómeno ocurrido por el 1150-1300 a.C., el consumo de maíz comienza a desplazar el de los recursos marinos. La tendencia a depender cada vez más en el cultivo de maíz se acrecentó durante el periodo del contacto español, como lo muestra el alto porcentaje de caries en la población, si bien se continuó la ingesta de plantas silvestres, fauna marina y terrestre.

Con ese panorama de antecedente, Ezzo *et al.* (1995) llevaron a cabo el análisis de paleodieta por elementos traza en una muestra esquelética integrada por nueve individuos del periodo preagrícola tardío (1000-1150 d.C.), 15 del periodo de contacto temprano (1608-1680 d.C.), y 15 del contacto tardío (1680-1702 d.C.). Tres objetivos adicionales motivaron la investigación: Uno, conocer si la técnica de elementos traza corroboraba los resultados de los otros estudios; segundo, conocer de qué forma los elementos traza coincidían o contradecían dichos estudios; y por último, conocer qué nueva información sobre la dieta y cambio dietético de la región podía aportar el análisis de elementos traza.

De las muestras óseas, todas tomadas de diáfisis de fémur de sujetos adultos de ambos sexos, se cuantificó el contenido de 11 elementos (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Sr y Zn), aunque para efectos de paleodieta se concentraron en el Ba, Ca y Sr. El resto se empleó para estimar la diagénesis ósea.

Los resultados revelaron para los tres periodos concentraciones muy bajas de Ba y muy altas de Sr, lo que a su vez derivó en valores Ba/Sr reducidos. Las muestras

correspondientes al periodo del contacto (temprano y tardío) resultaron más similares entre sí y más bajas, diferenciándose con claridad de las del periodo preagrícola. Al evaluar el comportamiento en su conjunto, con el transcurrir de los periodos la tendencia fue hacia menores valores Ba/Sr. Dichas características, tal y como es el consenso interpretarlas (ver Burton y Price 1990; también lo dicho antes en el presente Capítulo), indicaban no sólo un importante consumo de recursos marinos durante los tres periodos, sino que éste habría ocupado un papel cada vez más preponderante en la dieta del periodo colonial. Así, de manera categórica, el análisis de elementos traza refutaba la interpretación previa sobre la subsistencia antigua en la zona, que para el periodo del contacto indicaba un mayor consumo de maíz desplazando el de los recursos marinos.

¿Cuál era el motivo de semejante disparidad en los resultados?, ¿cuál era el escenario “correcto”? Ezzo *et al.* (1995) descartaron que la diagénesis afectara de forma crucial sus muestras óseas, pues la relación Ca/P se mantuvo siempre cercano al valor teórico del hueso fresco (2.15), y los elementos que *postmortem* suelen contaminar al tejido, como el Al, Fe, K y Mn, no estuvieron correlacionados con los niveles de Ba, Ca, y Sr. Por ende, la concentración de estos últimos se consideró de naturaleza biogénica. ¿Entonces? Al margen de los análisis químicos (isótopos y elementos traza), dos indicios eran testimonio irrefutable de un mayor consumo de maíz durante el periodo del contacto: los registros etnohistóricos y la alta incidencia de caries en la población. Ezzo y colaboradores consideraron que los análisis de elementos traza enfrentan dificultades con el maíz, debido a que su pobre contenido mineral le lleva a contribuir con muy poco Ba, Ca y Sr a la dieta. La ingesta de maíz puede disminuir o aumentar y no alterar las concentraciones de alcalino térreos de la dieta, dependiendo de las propiedades químicas del alimento al cual sustituye.

Para las poblaciones de Georgia Bight el aporte mineral de su subsistencia provino de dos fuentes principales: las plantas silvestres y los recursos marinos. El hecho de que los niveles de Sr, Ba y Ba/Sr de las muestras óseas se asemejaran a los de una dieta marina era síntoma de que el incremento en el consumo de maíz desplazó en mayor grado el de las plantas silvestres, y en menor medida el de los recursos del mar. Aunque estos últimos dominaron en el aporte mineral de la dieta, no lo hicieron en términos del porcentaje que representaron para la subsistencia en su conjunto, pues estuvo basada en el consumo de maíz. Para el análisis de elementos traza pasó inadvertida la ingesta de maíz, no obstante constituyera parte fundamental de la subsistencia. Ezzo *et al.* (1995) recalcan entonces la necesidad de considerar a los valores de Ba, Ca, Sr, Sr/Ca y Ba/Sr no como parámetros directos de la proporción de tejido animal/tejido vegetal, o de recursos terrestres/recursos marinos en la dieta, pues no lo son, sino como parámetros del nivel de calcio en ella.

Siguiendo con la lógica de los autores, resultará ilustrativo revisar de manera hipotética las consecuencias de la otra alternativa planteada: ¿qué efecto sobre el Ba, Ca y Sr hubiera tenido un mayor consumo de maíz en detrimento, no de las plantas silvestres como fue el caso, sino de los productos del mar? Los niveles de alcalino térreos se parecerían entonces a los propios de una dieta vegetal, misma que sin duda se habría interpretado dependiente del maíz, y ello como la “confirmación” del análisis de elementos traza a los estudios previos de paleodieta local (isótopos, paleopatología, etc.). Sin embargo, en realidad, la técnica de elementos traza ni siquiera habría detectado al maíz, sino a las plantas silvestres debido a su alto contenido mineral. La “confirmación” antes referida hubiera sido aparente, mas no objetiva.

El caso de Georgia Bight ofrece ejemplo claro de un escenario paradójico: aunque los valores de Ca, Ba, Sr, Sr/Ca y Ba/Sr del maíz pasaron inadvertidos para el análisis de elementos traza, fue justo el mayor consumo del cereal el que inclinaría los valores Ba/Sr de la dieta, y del hueso, hacia aquellos de los recursos vegetales o marinos, según sustituyera en la dieta a los productos del mar o a las plantas silvestres respectivamente.

De igual modo, la investigación de Ezzo *et al.* (1995) volvió patente la imprescindible necesidad de respaldar los estudios con fuentes complementarias de información, pues los análisis de elementos traza no bastan por sí solos. De hecho fue el auxilio de las otras fuentes, aunado por supuesto a las características de la muestra ósea (número de individuos, condiciones de preservación, paleopatología bucal), lo que permitió “matizar” los resultados de elementos traza, de lo contrario se habría tenido un panorama equívoco de la subsistencia antigua.

CAPÍTULO V

ESTUDIOS EN SOCIEDADES MESOAMERICANAS

Teniendo como referencia lo descrito en los capítulos previos respecto a diversas consideraciones metodológicas e interpretativas, a tomar en cuenta durante la aplicación de la técnica de elementos traza con fines paleodietéticos, vale ahora presentar estudios de caso realizados en colecciones de Mesoamérica. De las cinco subáreas que la integran, tres se encuentran representadas: la maya, el altiplano, y la oaxaqueña.

MAYAS

Lamanai, Belice

Lamanai es un sitio de las tierras bajas mayas localizado en el norte de Belice. El sitio tiene evidencia de una prolongada ocupación humana que comprende desde el periodo Preclásico hasta tiempos históricos (1670). Debido a su privilegiada ubicación geográfica, los antiguos habitantes de Lamanai dispusieron para su subsistencia de una amplia gama de recursos naturales, tanto acuáticos (de ríos, lagunas, estuarios, mar) como terrestres. White y Schwarcz (1989) realizaron un análisis de paleodieta en el sitio, empleando para ello la técnica de isótopos de carbono y nitrógeno (fase orgánica del tejido óseo), y la de elementos traza. Para ésta última los autores recurrieron al estroncio, zinc y magnesio como marcadores paleodietéticos, cuya abundancia diferencial en la biosfera hizo prever a los investigadores dos posibles escenarios del comportamiento conjunto de los elementos traza en los restos humanos del sitio: niveles bajos de estroncio y magnesio, pero altos de zinc

indicarían una dieta rica en tejido animal; por otro lado, concentraciones altas de estroncio y zinc señalarían importante consumo de productos marinos. Por supuesto que cualquiera de los escenarios debería tener su correspondiente confirmación en las estimaciones de isótopos.

La muestra esquelética elegida para el estudio de elementos traza fue un poco menor (42 individuos) que para el estudio de isótopos (51), pues se eligieron únicamente sujetos adultos y de sexo conocido. Por razones de preservación ósea y para evitar incluir distinto tipo de hueso, las muestras para ambas técnicas se tomaron sólo de costillas. Es claro que detrás de las precauciones en la selección de muestras está el interés por excluir la variabilidad de elementos traza entre grupos de edad, sexo y regiones anatómicas. Debido a lo anterior las submuestras de cada técnica tuvieron el 75% de individuos en común.

La distribución cronológica de los 42 individuos a quienes se aplicó el análisis de elementos traza es la siguiente: 3 sujetos masculinos del periodo Preclásico (1250 aC-250 d.C.); 4 individuos, tres masculinos y uno femenino, del Clásico Temprano (250-400 d.C.); 3 individuos, uno masculino y dos femeninos, del Clásico Tardío (650-900 d.C.); 5 masculinos del Clásico Terminal (900-1000 d.C.); 17 sujetos, diez masculinos y siete femeninos, del Posclásico; y 10 individuos, cinco masculinos y cinco femeninos, del periodo Histórico (1520-1670 d.C.).

De los 42 sujetos antes mencionados sólo cuatro no contaron con su correspondiente estudio de isótopos. Uno del Preclásico, otro del Clásico Tardío, otro del Posclásico, y el último del periodo Histórico. Las diferencias sociales en la muestra en su conjunto fueron consideradas mínimas, pues con excepción de dos entierros del Clásico Temprano depositados en tumbas, el resto se localizó en el centro ceremonial del sitio, asociados a

templos y estructuras de elite. Además de no haber diferencias significativas en la composición de las ofrendas de los individuos.

En lo que se refiere a los controles metodológicos de diagénesis y dieta, al análisis se incorporaron también muestras de fauna (herbívoros y perros) y de suelo, todas asociadas a los entierros humanos. Se utilizó además el estándar internacional de hueso. El tratamiento de limpieza aplicado a todas las muestras óseas fue el mismo empleado por Schoeninger (1979), es decir, el lavado con agua desionizada. Una vez secas, las muestras fueron trituradas en un mortero e incineradas. Como un parámetro para estimar la integridad mineral (hidroxiapatita) del tejido óseo, se cuantificó la relación Ca/P en una submuestra de 26 individuos, que incluyó a todos los periodos cronológicos estudiados. Valores más elevados al teórico (2.16) indicarían enriquecimiento de iones fosfato (PO_4), pero inferiores a 1.63 señalarían pérdida de calcio. No obstante que todas las muestras se caracterizaron por un mal estado de preservación macroscópica, la submuestra tuvo en promedio un valor Ca/P de 1.86, considerado dentro del rango normal, y que descarta incorporación de carbonato de calcio o pérdida de Ca.

Al conjuntar los resultados del análisis de elementos traza e isótopos, los autores identificaron cambios diacrónicos en las características de la dieta practicada por los antiguos habitantes de Lamanai, específicamente en lo que toca al componente vegetal. En este sentido, White y Schwarcz tuvieron particular interés por rastrear el consumo de maíz, debido a la importancia de dicho cereal en la alimentación de las sociedades mesoamericanas. Así, los resultados revelaron que en Lamanai durante el Preclásico el consumo de maíz ocupó una posición importante en la subsistencia y no marginal, como por años se había creído con base en los restos de flora y fauna. Sin embargo, para tiempos

del Clásico Tardío al Clásico Terminal disminuyó la ingesta del cereal, la cual para el Posclásico y periodo Histórico se incrementó, convirtiéndose en preponderante para la dieta de los individuos.

Las fluctuaciones en el consumo antes descritas pudieron atribuirse al maíz gracias a la respectiva variabilidad diacrónica de los valores de ^{13}C , isótopo que en el continente americano distingue de manera inequívoca al cereal. Es importante observar que los cambios en el registro de dicho isótopo estuvieron correlacionados con el comportamiento del estroncio. Es decir, el alcalino térreo presentó para el Preclásico concentraciones bajas en el tejido óseo respecto a las registradas en el Clásico Tardío-Terminal, y para el periodo Histórico más bajas incluso que en el Preclásico. Semejante distribución cronológica del estroncio, y su asociación al isótopo ^{13}C y por ende con el maíz, tiene sentido si se toma en cuenta, como bien indican los autores, el bajo contenido mineral que distingue al maíz. De manera que cuanto más predomina su consumo en la dieta, menores los niveles de estroncio en hueso, y viceversa.

Los cambios temporales relacionados con el mayor o menor consumo de tejido vegetal no repercutieron, contrario a lo que pudiera pensarse, sobre todo por el largo lapso de tiempo comprendido por el estudio, en el componente animal de la subsistencia, pues se mantuvo constante a través de los periodos cronológicos, como resulta de la notable estabilidad de los valores de ^{15}N . Por su parte, desde la perspectiva de los autores, el comportamiento de los elementos traza (Sr, Mg y Zn) no avaló posibles cambios en la ingesta de recursos animales. Como se recordará, para el caso de un importante consumo de carne los autores esperarían registrar altos niveles de Zn y bajos de Sr y Mg o, de tratarse

de fauna marina, altos niveles de Sr y Zn. Ninguno de los dos escenarios se presentó. Además, cabe recordar, el Sr estuvo relacionado con el isótopo ^{13}C que distingue al maíz.

El magnesio varió sin un patrón definido y sin asociación al estroncio o al isótopo ^{13}C , motivo por el cual White y Schwarcz (1989: 467-468) lo consideraron de nula utilidad paleodietética. Por su parte, el zinc mostró un comportamiento cuya explicación resulta más compleja, debido a que tanto el tejido muscular de los vertebrados como los cereales poseen elevadas concentraciones de zinc. Estos últimos también contienen un fosfato orgánico (ácido inositol hexafosfórico) conocido bajo el nombre de fitato, que impide al intestino de los mamíferos la plena absorción del zinc incorporado en la dieta. El fitato, sin embargo puede eliminarse durante el proceso previo de preparación (molienda, inmersión en agua con cal, por ejemplo) que para el consumo del maíz llevan a cabo diversos grupos humanos. Por tal motivo las sociedades cuya subsistencia depende del cultivo de maíz y que no procesan del modo antes dicho al cereal, se caracterizan por registrar bajos niveles de zinc en los restos óseos de los individuos, y elevados en los de las sociedades que sí eliminan los fitatos. En suma, la abundante disponibilidad dietética de zinc no necesariamente corresponde a sus niveles de absorción metabólica.

Tomando en cuenta lo anterior, White y Schwarcz (1989: 467-468) observaron que en Lamanai los niveles óseos de zinc fueron relativamente bajos y estables durante el Preclásico, periodo en el cual ya se detecta consumo de maíz, pero a partir del Posclásico hasta el periodo Histórico, donde el consumo de maíz predomina, se registró un constante incremento en los niveles de zinc. Dado que el componente animal de la dieta se mantuvo constante a lo largo del lapso de tiempo estudiado, de acuerdo a los resultados del isótopo ^{15}N , la variabilidad diacrónica de zinc estaría relacionada entonces con el componente

vegetal de la subsistencia. Si como lo indicaron los resultados de ^{13}C y los niveles de estroncio, el consumo de maíz fue cada vez mayor del periodo Posclásico al Histórico, ¿cómo explicar entonces que los niveles de zinc se incrementaran y no disminuyeran? Basándose en un relato etnohistórico de fray Diego de Landa, quien describe que poblaciones mayas sumergían por tiempo prolongado en agua con cal al maíz, como parte del procesamiento previo, White y Swarcz consideraron factible que de esa manera se eliminaran los fitatos. Así quedarían explicados para los periodos tardíos los elevados niveles de zinc, los menores de estroncio y los resultados del isótopo ^{13}C , que en conjunto apuntarían a una mayor dependencia en el cultivo de maíz por parte de los antiguos habitantes de Lamanai.

En resumen, mediante la aplicación complementaria de las dos técnicas de análisis químico de restos humanos para inferir paleodieta (isótopos y elementos traza), White y Swarcz ofrecieron el siguiente panorama de la antigua subsistencia en el sitio maya de Lamanai desde tiempos del Preclásico hasta del periodo Histórico (1520-1670 d.C.): durante todo ese tiempo la ingesta de tejido animal y la proporción que representó para la dieta se mantuvo sin cambio, no así en lo que toca al tipo de plantas consumidas. El maíz siempre estuvo presente en la dieta pero su consumo registró una disminución durante el Clásico, siendo parcialmente desplazado por otros vegetales cuya especie se desconoce. Pero desde el Posclásico aumenta de forma sensible el consumo de maíz dominando el componente vegetal de la dieta. De las otras plantas cuya presencia fue detectada durante el Clásico ya no hubo registro en periodos posteriores.

La investigación hace patente lo complejo que resulta inferir paleodieta con base en los análisis químicos de restos humanos. En el caso de la técnica de elementos traza, son

varias las consideraciones a tomar en cuenta, más allá de los niveles absolutos de elementos (Sr, Ca, Zn), pues a la composición química de los diversos alimentos consumidos por la población, debe agregarse los cambios provocados por la forma de preparación de los alimentos. Por ejemplo, el tratamiento que darían los mayas al maíz previo su consumo (sumergirlo en agua con cal), posiblemente eliminó los fitatos proponen White y Swarcz (1989:467-468), pues en el germen de maíz son en su mayoría solubles. Cabe preguntarse, por otro lado, si dicho tratamiento habría incrementado, a su vez, los niveles de alcalino térreos (Sr, Ca, Ba) asociados con la ingesta del cereal. Pero al margen de ello, y sin duda más importante, los autores en ningún momento ofrecen evidencia de naturaleza fisiológica, donde fundamentar su dicho de que altos niveles de zinc en la dieta se traducen, a su vez, en elevados niveles en la fase inorgánica del tejido óseo. De acuerdo a la clasificación de Ezzo (1994b), en el caso de Lamanai, el zinc fue estudiado desde un punto de vista empírico, sin sustento: la variable concentración del elemento en la biosfera (plantas, animales) *se esperaría ver reflejada* en la química ósea, según el tipo de alimento consumido de forma habitual y preponderante. Trato extensivo también para el magnesio.

Debido a su papel fundamental en la subsistencia mesoamericana, vale la pena destacar el caso del maíz y su reconocimiento por las técnicas de paleodieta. Su consumo fue identificado de manera fundada en la química del tejido óseo por los valores del isótopo ^{13}C , los cuales a su vez fueron corroborados por los bajos niveles de estroncio. En cuanto al consumo de carne en Lamanai, los elementos traza cuantificados (Mg, Sr, Zn) no fueron de utilidad, como en cambio sí lo fueron los isótopos de ^{15}N .

Desde un punto de vista tradicional o lineal de los elementos traza, distintiva por considerar que la relación Sr/Ca o los niveles absolutos de Sr indicarían mayor consumo

vegetal en la medida que estos se incrementan, los resultados de Lamanai para el periodo Posclásico e Histórico se interpretarían de la siguiente manera: dado que el estroncio disminuyó de forma notable, entonces la población de dichos periodos incrementó de igual modo su ingesta de carne disminuyendo en correspondencia el consumo de vegetales. Panorama completamente opuesto (o “paradójico”, siguiendo a Burton y Wright 1995: 278-279) al ofrecido para Lamanai por White y Scwarcz. De acuerdo a la perspectiva lineal, si un componente de la dieta (plantas, carne) cambia su proporción relativa, entonces necesariamente el otro también lo hará en igual magnitud aunque en sentido contrario. Pero como ya se ha descrito en páginas anteriores, la realidad es más compleja, baste revisar Burton y Wright (1995), Ezzo *et al.* (1995) y el estudio de paleodieta de Lamanai.

Dzibanché y Kohunlich, Quintana Roo

Nalda *et al.* (1999) realizaron el análisis de elementos traza en restos humanos de los sitios mayas de Kohunlich y Dzibanché, ambos al sur del estado de Quintana Roo, México. En total se estudiaron 28 individuos. Las 16 muestras de Kohunlich provienen de dos conjuntos habitacionales explorados a inicios de los años 90 (el Complejo Norte y Los 27 Escalones). Con excepción de un entierro que data al Posclásico Temprano (900-1200 d.C.), el resto está fechado para el Clásico Tardío (600-900 d.C.). Cinco de estos últimos fueron asignados arqueológicamente a un estatus medio y los demás a uno bajo.

Por su parte, la colección de Dzibanché comprendió 11 individuos y, a modo de control diagenético y dietético, los restos de un jaguar asociado a uno de los entierros. En las muestras del sitio predominó la diversidad cronológica, pues dos individuos proceden del Clásico Temprano (250-450 d.C.), dos individuos al Clásico Tardío (600-750 d.C.), y

cinco al Clásico Tardío-Clásico Terminal (800-1000 d.C.). También se observó diversidad en cuanto a los grupos de edad, pues se incluyeron además de adultos, tres individuos cuyo rango se estimó entre 0-10 años de edad. A diferencia de lo ocurrido en el sitio de Kohunlich, en Dzibanché los criterios arqueológicos (lugar de enterramiento, características de la ofrenda asociada) permitieron identificar con claridad dos estatus sociales, uno alto y el otro bajo.

Nalda y colaboradores (1999: 36) emplearon a la relación Sr/Ca cuantificada en los restos óseos como un parámetro de la cantidad de tejido vegetal incluido en la dieta, y a la relación Zn/Ca como un “complemento que apoya o cuestiona los valores de estroncio”. Esta última en la práctica fue considerada una medida del consumo de tejido animal, aunque para dicho planteamiento no se ofreció respaldo fisiológico respecto a la relación dieta-metabolismo óseo del zinc.

De ninguna de las muestras óseas analizadas se especificó la región esquelética seleccionada. En cuanto al tratamiento a ellas aplicado para contrarrestar la diagénesis, sólo se recurrió a la remoción, por raspado, de las superficies externas e internas del hueso, incluyendo los remanentes de tejido esponjoso. La contaminación química de carácter homogéneo, en cambio, no fue tratada por ningún medio. Entre los parámetros para estimar el efecto de la diagénesis sobre el tejido óseo se tomaron en cuenta la cuantificación de elementos ajenos a la composición natural del tejido, y el uso de un estándar internacional de hueso (H-5). No hubo comentario sobre análisis químicos del suelo donde fueron localizados los entierros. Como referente dietético fue incluida muestra ósea de un jaguar hallado en asociación de un entierro en el sitio de Dzibanché, referente que fue hecho extensivo también para las muestras de Kohunlich. Una vez raspadas, cada muestra ósea

fue triturada en mortero de ágata hasta convertirla en polvo fino, y dos gramos de éste se utilizaron para la cuantificación de elementos traza mediante fluorescencia de rayos X.

Los autores reconocieron que su estudio de paleodieta enfrentaba serias limitantes interpretativas, en virtud de los varios periodos cronológicos y estatus representados, así como por el reducido número de muestras para cada uno de ellos. Debido a lo anterior, y a reserva de ser confirmadas por futuras investigaciones, los autores plantearon algunas tendencias preliminares, sugeridas por los niveles de Sr/Ca y Zn/Ca cuantificados. Es necesario apuntar, sin embargo, que tales tendencias resultan poco sustentables metodológicamente, pues implican la comparación, en igualdad de términos, entre las concentraciones de elementos traza de individuos subadultos y adultos, procedimiento que no se recomienda debido a la variabilidad fisiológica en la absorción intestinal de alcalino térreos propia de los subadultos, comentada en el Capítulo II.

Así por ejemplo, Nalda *et al.* (1999: 42) plantean que en Dzibanché los registros de Sr/Ca y Zn/Ca permiten identificar diferencias en la composición de la dieta según fuese el estatus social del individuo, de manera que los restos de quienes vivieron en el complejo habitacional de bajo estatus contenían estroncio en mayores cantidades a lo registrado en los sujetos de alto estatus, que yacían al interior de los basamentos piramidales. Los primeros, por ende, tendrían una dieta de importante componente vegetal, y los segundos, al ubicarse más próximos de los niveles del carnívoro control (jaguar), disfrutarían de una dieta rica en proteína animal. Pero cuando se observan las edades de los cinco individuos con más alto nivel Sr/Ca (mayor consumo vegetal, de acuerdo a la interpretación), resulta que se trata de tres subadultos (0-10 años de edad), un individuo en el rango subadulto-adulto (15-35 años de edad), mientras que el único que se ubica por completo en el rango

adulto (25-55 años de edad) presenta un valor $\log(\text{Sr}/\text{Ca})$ de -3.35 , no significativamente distinto al de dos adultos de la clase alta (-3.37 ; -3.40).

Contrario a lo dicho por Nalda *et al.* (1999: 42), en Dzibanché los niveles de Zn/Ca , criterio para la ingesta de carne, tampoco distinguen entre estatus. Es cierto que los sujetos adscritos a una posición social privilegiada presentan valores de Zn/Ca próximos al del jaguar, pero también es cierto que el rango de valores cuantificado para dicho estatus es amplio (-3.048 a -3.515), no muy distinto al registro del único sujeto de clase baja y adulto (-3.544).

De igual forma, cuando los autores comparan sus resultados entre sitios observan niveles más altos de estroncio en Dzibanché, lo cual les sugiere posibles implicaciones para la relación política entre ambos sitios durante el periodo Clásico Tardío. Sin embargo, al revisar los valores más altos de estroncio para Dzibanché, estos corresponden a subadultos y a subadultos-adultos. Por último, y derivado de la comparación anterior, atribuyen para los subadultos una dieta vegetal y para los otros grupos de edad dietas que incorporaron variable cantidad de tejido animal. Ello les lleva a sugerir para futuras investigaciones estudiar “posibles diferencias dietéticas a favor de los adolescentes y adultos jóvenes” (Nalda *et al.*, 1999: 43). La diversidad cronológica, el reducido número de individuos de la muestra en su conjunto, y la comparación entre grupos de edad, no permiten compartir los planteamientos preliminares formulados por los autores.

TEOTIHUACÁN

La investigación de paleodieta por elementos traza en restos humanos de Teotihuacán, realizada por Manzanilla *et al.* (1996), tuvo como base muestras de costillas, de un total de

28 individuos distribuidos de la siguiente manera: 14 localizados en la Cueva del Pirúl y pertenecientes a la fase Coyotlatelco tardía (600-800 d.C.); nueve de la Cueva de las Varillas, siendo cuatro de la fase Coyotlatelco tardía, dos de la época tolteca y tres del periodo Mazapa (900-1000 d.C.); “restos óseos” de la fase Xolalpan (ca 500 d.C.) localizados en Ostoyohualco, conjunto habitacional en las inmediaciones de la urbe; y finalmente cuatro sujetos de Teopancazco pertenecientes al momento del colapso teotihuacano. Entre los 28 individuos seleccionados predominan los neonatos e infantes (16).

Como elementos diagnósticos de paleodieta los investigadores utilizaron al estroncio y al zinc, éste a manera de complemento del primero, pero no se proporciona descripción de procesos metabólicos óseos que justifiquen la inclusión del zinc como marcador trófico. Aunque se tomaron precauciones para contrarrestar el efecto de la diagénesis y para estimar su incidencia (abrasión física de la superficie externa de las muestras óseas; cuantificación de los niveles de Fe, Al y K en el tejido; análisis de restos faunísticos de herbívoro, todos de conejo localizados en las cuevas al mismo nivel de los entierros), no se menciona, sin embargo, análisis químicos del suelo donde yacían los entierros, ni tampoco tratamiento con ácido acético para aminorar los efectos de la contaminación química por diagénesis de los restos óseos.

Los resultados del análisis de elementos traza fueron interpretados por Manzanilla *et al.* (1996) en dos vertientes. Una, diacrónica, de acuerdo a los periodos cronológicos presentes en la muestra esquelética, y la otra comparando los resultados por grupos de edad para el caso exclusivo de los entierros localizados en túneles y posteriores a la caída de Teotihuacán. En lo que a la primer vertiente se refiere, todos los individuos, excepto los de

Ostoyohualco, registraron valores Sr/Ca ubicados dentro o cerca del rango correspondiente al del herbívoro control (conejo), por lo tanto los individuos practicarían una dieta con mayor presencia de alimentos vegetales, mientras que los habitantes de Ostoyohualco, al presentar valores más bajos de Sr/Ca, habrían gozado de una dieta más equilibrada en el consumo de recursos animales y vegetales. Los autores plantearon como hipótesis posibles implicaciones ecológicas derivadas de lo anterior: merma en la disponibilidad de recursos animales para tiempos del colapso teotihuacano, a consecuencia de una posible sobre explotación del recurso durante periodos previos y/o a condiciones de sequía.

De la interpretación diacrónica descrita cabe hacer dos observaciones. Primera, dado que los restos de fauna utilizados como parámetro dietético provienen de las cuevas, y a reserva de conocer los detalles del respectivo entorno diagenético, quizás no sean un parámetro igualmente válido para los restos de Ostoyohualco. Segunda, de acuerdo a los autores la relación Sr/Ca señala que los individuos del Clásico (Ostoyohualco) consumieron más proteína animal que en periodos posteriores, sin embargo, cuando se revisan los valores absolutos de zinc, que “corresponden a la cantidad de carne en la dieta” (Manzanilla *et al.*, 1996: 15), llama la atención observar en las muestras de Ostoyohualco los niveles más bajos de zinc, y no los más altos, de todas las muestras analizadas, si bien los valores Zn/Ca lo son.

Ahora, en lo que corresponde al análisis comparativo de dieta entre grupos de edad, realizado exclusivamente para los individuos de las cuevas y posteriores a la caída de Teotihuacán, los neonatos presentaron valores Sr/Ca con tendencia a ser más elevados (hacia lo herbívoro), los infantes mayores de 2-3 años de edad presentaron valores más bajos si bien el rango de variabilidad es mayor. Por su parte los adultos ocuparon una

posición intermedia a los dos grupos anteriores, y su rango de variabilidad fue más estrecho. Los resultados para el primer grupo fueron interpretados como “reflejo de las condiciones nutricionales de las madres” (Manzanilla *et al.*, 1996: 22), y para el segundo como el consumo de “más elementos de origen animal” respecto a edades previas (*ibid*). Cabe aquí recordar sin embargo lo dicho en el Capítulo II respecto a que la edad y el sexo de los individuos son dos importantes factores de incidencia fisiológica en las concentraciones óseas de Sr/Ca. Debido a que la placenta y las glándulas mamarias constituyen regiones de la anatomía materna donde se produce adicional discriminación contra el Sr y a favor del calcio, los neonatos de cualquier población tienen los niveles más bajos de Sr/Ca, mientras que las madres entre los más altos. Es claro entonces que los niveles de los neonatos no son “un reflejo de los de las madres”. Por otro lado, aunque la dieta de los infantes ya no incluya leche materna, sus niveles óseos de Sr/Ca se ven más influidos no tanto por la proporción del tipo de alimentos consumidos, sino por el proceso de biopurificación intestinal cuya eficiencia está en vías de desarrollo. Por tal motivo los infantes y subadultos de las poblaciones presentan los más amplios rangos de variabilidad Sr/Ca en el tejido óseo. En conjunto, esas son las razones por las que metodológicamente no es permitido comparar, en igualdad de términos, las concentraciones de elementos traza entre grupos de edad.

MONTE ALBÁN

Blitz (1995) realizó un análisis de paleodieta en el sitio de Monte Albán. Para tal propósito recurrió a las dos técnicas de análisis químico de restos óseos: elementos traza, e isótopos estables de carbono y nitrógeno. Para la primer técnica, Blitz eligió a un conjunto de 227

individuos (96 masculinos, 43 femeninos, y 88 de sexo indeterminado), todos mayores de 15 años de edad al momento de su muerte, y de los cuales fue posible obtener una muestra ósea de 1 gramo de tejido cortical diafisario, de acuerdo al siguiente orden de preferencia: fémur (N= 152), tibia (39), húmero (24), peroné (10).

Los criterios metodológicos de edad y tipo de tejido óseo impuestos en la selección de individuos, acotaron la distribución cronológica de la colección estudiada (Formativo Terminal, Clásico y Postclásico), así como la representatividad según el contexto de enterramiento (Tumba; No tumba). Por otro lado, de los 15 barrios que integran el sitio de Monte Albán, no todos aportaron material óseo para la investigación de paleodieta, pues éste procedió sólo de los barrios 1, 2, 4, 6, 7 y 8. De ellos, el barrio 2 quedó mejor representado (N= 87), pues por corresponder a la Plaza principal y edificios aledaños del sitio, es el que históricamente ha recibido mayor atención arqueológica.

Cada muestra ósea fue sometida a un tratamiento de limpieza física y química. Primero se retiró por raspado entre 1 a 3 mm de toda la superficie ósea, luego fueron lavadas por espacio de 30 minutos con una solución de ácido acético 1N. Posteriormente se enjuagaron con agua desionizada para retirar los residuos de ácido acético y fueron secadas a una temperatura de 80 °C durante 24 horas. Enseguida fueron incineradas a 725 °C por 8 horas. Una vez enfriada, cada muestra se trituró hasta conseguir una consistencia de polvo fino. Debido al tipo de instrumental utilizado para la cuantificación de elementos traza (Espectrometría de Emisión de Plasma Inductivamente Acoplado, ICP por sus siglas en inglés) aproximadamente 50 mg del polvo de ceniza ósea fue digerida o disuelta en ácido nítrico. Una vez disuelta, de cada muestra se cuantificó la concentración de 10 elementos (Al, Ba, Ca, Fe, Mg, Mn, Na, P, Sr y Zn). Blitz empleó sólo al Ba, Ca y Sr como

marcadores dietéticos, y al resto de los elementos como criterios de contaminación por diagénesis. A modo de control diagenético, la autora empleó un estándar internacional de tejido óseo, pero por otro lado no hubo análisis químico de restos faunísticos (herbívoros, carnívoros) contemporáneos a los entierros humanos.

Las concentraciones de elementos traza e isótopos estables de C y N, resultado del estudio químico fueron interpretados por Blitz a varios niveles de análisis. Uno de ellos, de carácter diacrónico, consistió en agrupar a las muestras óseas por periodos cronológicos (Formativo Terminal, Clásico y Postclásico), con el fin de detectar exclusivamente eventuales cambios de dieta en Monte Albán a través del tiempo. Otros dos niveles de análisis tuvieron como propósito identificar una posible asociación entre el estatus social y el tipo de dieta, sea comparando los resultados del estudio químico de los restos óseos con la información del contexto de enterramiento (tumba, no tumba) de cada individuo, y el lugar dentro del sitio (Barrio) donde fue localizado cada entierro. Estas dos últimas variables (contexto y procedencia) posibles indicadores arqueológicos de estatus.

En lo que toca al análisis diacrónico, las muestras del periodo Formativo registraron valores significativamente más elevados de Sr, Ba y ^{13}C de los correspondientes al Clásico y Postclásico. Estos dos últimos periodos presentaron niveles de elementos traza e isótopos similares. Blitz reconoció que tal panorama podía interpretarse de dos formas, ambas teniendo como eje rector al maíz. Una de tales interpretaciones indica que si se toma en cuenta el pobre contenido mineral del maíz, entonces los altos niveles de Sr y Ba registrados para las muestras del Formativo indicarían que especies vegetales distintas al maíz, y ricas en aporte mineral, ocuparon destacado papel en la dieta del Formativo. En lo que toca a los niveles de ^{13}C para dicho periodo, indican además importante consumo de

plantas tipo C_4 como por ejemplo el amaranto, quelite y el maíz, identificados arqueológicamente en el sitio. La ingesta de éste último cereal sin embargo, no fue dominante en la dieta, pues de lo contrario los niveles de Sr y Ba habrían sido bajos para el Formativo y no altos.

A la interpretación anterior, Blitz confrontó otra que se distingue por presuponer un tratamiento alcalino aplicado al maíz previo a su consumo, elevando así de manera drástica el aporte mineral del maíz a la dieta. Sin embargo, la autora ofrece dos razones que volverían poco probable ésta última interpretación: Primera, los niveles de Sr y Ba registrados para las muestras del Formativo resultan en realidad bajas para lo que cabría esperar del consumo de maíz tratado; Segunda, de acuerdo a la evidencia arqueológica, es durante el periodo Clásico cuando se incrementó de forma notable el consumo de maíz, entonces ¿por qué los niveles de Sr y Ba de las muestras de dicho periodo disminuyen sensiblemente y no aumentan del mismo modo?

Lo anterior permite proponer a Blitz que para el caso particular del periodo Formativo, los niveles de Sr y Ba registran el consumo de plantas silvestres ricas en minerales. Con esa toma de posición, la autora ofrece el siguiente panorama diacrónico de la dieta en Monte Albán: Durante el Formativo Tardío la alimentación tuvo como base el consumo de plantas silvestres ricas en minerales y también el de otras del tipo C_4 (amaranto, quelite y maíz), lo que estaría acorde con los niveles de alcalino térreos y los valores menos negativos de ^{13}C . Para tiempos del Clásico el análisis químico detecta un cambio cualitativo en la dieta de los habitantes de Monte Albán. Los vegetales silvestres ricos en minerales, cuyo consumo fue importante durante el periodo anterior, son desplazados de la dieta, si bien no del todo eliminados de ella, por una mayor cantidad de

alimentos de menor contenido mineral, tales como el maíz y/o la carne, hecho que explicaría la disminución en los niveles óseos de Sr y Ba. También decrece en cierto grado el consumo de otras plantas C₄ (amaranto, quelites), fenómeno traducido en niveles más negativos del isótopo ¹³C. Durante el periodo Postclásico la dieta presenta una composición similar a la del Clásico, con la única diferencia de que el rango de variabilidad es más estrecho.

Llama la atención que sea en el periodo Clásico, caracterizado por el establecimiento de una bien definida jerarquía social entre individuos, cuando se identifica mediante el análisis químico de los restos óseos un cambio cualitativo en la dieta, mismo que conllevó mayor consumo de maíz, pero más importante aún el de carne, por su asociación que suele atribuirse con el estatus social.

Justo para reconocer asociación entre estatus social y tipo de dieta (consumo de carne en mayor proporción al de tejido vegetal), Blitz evaluó el comportamiento de tres variables para cada individuo representado en la muestra esquelética estudiada: los niveles de alcalino térreos (Ba, Ca, Sr) e isótopos estables de C y N, el contexto de enterramiento (tumba, no tumba), y el Barrio de donde procede cada entierro.

Cuando la autora evaluó la relación de las dos primeras variables, esperando registrar para los individuos depositados en tumbas una dieta de alto contenido cárnico (traducida por bajos niveles de Sr y Ba), observó que los resultados no confirmaban el supuesto. Sin embargo, cuando al análisis incorporaba a la tercer variable (Barrio de procedencia), ésta permitió identificar que un mayor consumo de tejido animal se hallaba en concordancia con el estatus que dentro del sitio ocupó cada barrio, independientemente del contexto de enterramiento de los individuos. Así, el Barrio 2, que comprende a la Plaza principal del

sitio, y los barrios más inmediatos a él, cuentan con las muestras óseas de menores niveles de Sr y Ba, mientras que en los más alejados (Barrios 7 y 8) se registraron los más altos niveles de alcalino térreos de la muestra esquelética estudiada. Es importante destacar que para el caso específico de Monte Albán, el análisis de elementos traza (Ba y Sr) no fue suficiente por sí mismo para identificar diferencias de estatus social, pues en dicho propósito resultó imprescindible tomar en cuenta otros criterios, como por ejemplo el lugar específico donde fue depositado el individuo.

CAPÍTULO VI

CONSIDERACIONES FINALES

En el curso de los capítulos precedentes ha quedado constancia de la gestación y desarrollo de la técnica que tiene como base la cuantificación de elementos traza de restos humanos, para estimar las características de la dieta practicada por las poblaciones pretéritas.

El ánimo de entusiasmo suscitado entre la comunidad científica por los primeros estudios, que mostraban la relativa facilidad con la cual era posible obtener información directa sobre la composición vegetal/animal de la dieta antigua, cambió drásticamente conforme otros investigadores, éstos más cautos, hacían énfasis en la necesidad de corroborar por medios experimentales las premisas y presupuestos donde encontraba apoyo la técnica de los elementos traza en su conjunto. Éstas nuevas investigaciones tendrían a la postre importantes repercusiones, que bien pueden agruparse en dos grandes rubros: uno, de carácter metodológico, y el segundo relacionado con los alcances interpretativos que permite formular el análisis de paleodieta. Cabe destacar que en ambos gravita de manera omnipresente un fenómeno en principio subestimado: la diagénesis ósea, es decir, la modificación química *postmortem* del tejido óseo, provocada por las circunstancias físico-químicas particulares del lugar de enterramiento.

a) Metodología

La implementación de un análisis de elementos traza se ve ineludiblemente constreñida por requerimientos metodológicos concretos, y en la medida que éstos puedan cubrirse, el

estudio resultante se verá cuestionado no ya en esos términos sino, en términos interpretativos. Ciertamente, el hecho de trabajar con restos óseos antiguos implica siempre un sesgo en lo que se refiere a la representatividad de la muestra, pues el proceso de preservación diferencial *in situ* del tejido afecta de distinto modo, según sea la edad del individuo y la región anatómica del esqueleto. La preservación diferencial puede entonces por sí misma hacer viable, controvertible, o en el peor de los casos imposible un estudio químico de paleodieta.

Hoy día el consenso indica que la muestra ósea debe incluir únicamente individuos adultos, al menos entre 10 a 12, que cuenten con una estimación de sexo. Cada muestra, que puede ser desde 2 gramos de peso, debe tomarse de tejido compacto diafisario, en el siguiente orden de preferencia: fémur, tibia, húmero. Lo anterior obedece a dos razones: la remodelación ósea del tejido compacto transcurre a un ritmo más lento que el del tejido esponjoso, por lo que su composición *antemortem* refleja procesos metabólicos más constantes y de largo plazo, convirtiéndolo en un inmejorable indicador del metabolismo y dieta promedio del individuo. Por otro lado, al ser menos poroso, el tejido compacto es menos permeable y menos susceptible a los cambios diagenéticos que el tejido esponjoso. Y finalmente, dado su diámetro cortical, el tejido compacto diafisario puede ser sometido a los tratamientos de limpieza y aún así conservar cantidad suficiente de tejido para el análisis químico.

Con los criterios de selección de la muestra antes descritos se busca acotar las concentraciones de elementos traza derivados de la dieta, controlando, en la medida de lo posible, fuentes adicionales de variabilidad *ante* y *postmortem* relacionadas con el género, edad y región anatómica elegida de cada individuo.

Es recomendable analizar por separado las muestra femeninas de las masculinas, pues las primeras suelen presentar niveles más altos de alcalino térreos a consecuencia, no necesariamente de la dieta, sino como respuesta metabólica a estados fisiológicos propios del género: embarazo, lactancia.

A principios de la década de los años 80s del siglo XX, la diagénesis ósea ocupó, y sigue ocupando, un papel preeminente en la preocupación de quienes llevan a cabo estudios de paleodieta por medio del análisis de elementos traza. Con el tiempo, varias estrategias fueron desarrolladas para reconocer y contrarrestar hasta cierto punto los efectos de la diagénesis. Algunas de esas estrategias tienen como punto de partida a las muestras óseas mismas. Así por ejemplo, como parte de un protocolo de limpieza aceptado, cuyo objetivo es restablecer los niveles *antemortem* de alcalino térreos eliminando los efectos de la diagénesis física y química, es necesario retirar por raspado con bisturí entre 1 a 3 mm de la superficie de cada muestra ósea. Hecho lo anterior, cada muestra debe ser lavada con una solución de ácido acético 1N, procedimiento que permite separar por disolución diferencial la apatita diagenética, distintiva por su alto contenido de carbonato y de alcalino térreos (Sr) asociados, de la apatita biogénica o *antemortem*.

Es muy importante que el mismo procedimiento de limpieza se aplique también a muestras de vertebrados herbívoros y carnívoros localizados en asociación de los restos humanos de interés, o en su defecto pertenecientes al mismo sitio y temporalidad. De ese modo los niveles de elementos traza cuantificados en los restos faunísticos ofrecerán un parámetro general para el espectro dietético herbívoro y carnívoro propio de ese ecosistema particular, y por ende un referente imprescindible para ubicar los resultados de las muestras humanas.

Otros controles de diagénesis consisten en evaluar el estado de preservación de la fase mineral (relación Ca/P) y orgánica (relación C/N) del tejido óseo. Sin embargo, para efectos de los estudios de paleodieta, ambos son indicadores generales e indirectos, pues no son útiles para reconocer enriquecimiento o pérdida de elementos como el Sr y Ba, los dos marcadores dietéticos indiscutibles. Baste revisar el comentario al trabajo de Ezzo (1992) en Ventana Cave (ver Capítulo III, apartado *Reconociendo el problema*).

El uso de los niveles óseos de Sr en poblaciones modernas de distintas partes del mundo sin duda resulta ilustrativo como un parámetro respecto al contenido “normal” del elemento en el esqueleto humano. Con todo y las diferencias geográficas, geológicas y dietéticas entre las poblaciones estudiadas, el promedio es de 234 ppm, siendo 772 ppm el nivel más alto. Teniendo en cuenta esto, así como las concentraciones reportadas en poblaciones pretéritas, existe cierto consenso para suponer contaminación por diagénesis a valores que rebasen las mil ppm de Sr en restos humanos arqueológicos (Radosevich, 1993: 283, 313-315).

b) Alcances interpretativos

Para iniciar con este punto es necesario preguntarse ¿cuál de los dos enfoques del análisis por elementos traza (multielementos, o el que se basa en el Sr, Ba y Ca) es conveniente llevar a cabo? El segundo de los enfoques mencionados es hasta ahora el único que cuenta con sustento fisiológico, reconocido experimentalmente y registrado en restos óseos antiguos. El sustento deriva del proceso conocido como biopurificación del calcio o discriminación del Sr y Ba. Ello obedece en buena medida a las similitudes químicas que ambos alcalino térreos no esenciales comparten con el calcio, y a que la fracción de ellos

absorbida por el organismo es depositada casi en su totalidad en la fase mineral del tejido óseo (hidroxiapatita).

La asunción de que otros elementos químicos, constituyentes fundamentales de los recursos vegetales y animales consumidos por las poblaciones humanas, tienen un comportamiento metabólico similar al del Sr y Ba, y por ende funcionan también como marcadores dietéticos, propuesta defendida por el enfoque multielementos, carece de validez. Baste recordar el ejemplo ilustrativo del Mg, elemento esencial de la molécula de clorofila y que por ese hecho se le atribuyó de manera empírica utilidad para reconocer en el tejido óseo dietas con predominio de recursos vegetales. El estudio experimental realizado por Klepinger (1990) demostró, sin embargo, la falta de correspondencia entre los niveles de Mg en la dieta y los registrados en el tejido óseo. Por consiguiente, respecto al Mg y a otros elementos distintos al Sr, Ba y Ca, se puede concluir que su abundancia relativa, según sea el tipo de recurso (vegetal o animal) es un criterio insuficiente para atribuir consumo diferencial de dichos recursos, así como de la proporción en que fueron incorporados a la dieta por una población determinada.

Pero el hecho de afirmar que los niveles óseos de Sr, Ba y Ca representan el enfoque de paleodieta por elementos traza con sustento fisiológico, no significa de modo alguno afirmar su infalibilidad, ni mucho menos que esté exento de dificultades o controversias que acotan las inferencias o alcances interpretativos. Casi 30 años luego de su primera aplicación, ¿sigue siendo válido afirmar que los valores Sr/Ca disminuyen conforme se asciende en la cadena alimenticia de un ecosistema dado? La respuesta es un contundente sí, con una salvedad: siempre y cuando las especies estudiadas hayan establecido verdaderas relaciones tróficas (predador-presa), pues de lo contrario la biopurificación

diferencial del calcio, incluso al interior de cada peldaño de la pirámide trófica de un ecosistema particular, no garantiza una efectiva separación de las especies de acuerdo al lugar que ocuparon en su ecosistema. Para que el estudio tenga éxito es necesario que el investigador tenga conocimiento previo de las relaciones bióticas entre las especies, y con base en ello elegir a las que serán incluidas en el estudio. En ese sencillo ejemplo que comprende a la flora y fauna de un hábitat cualquiera, habría correspondencia entre los valores óseos de Sr/Ca siempre menores a los de la dieta y en correspondencia a la posición trófica. Pero cuando se analizan los restos óseos de seres humanos, y por ende cuya dieta se caracterizó por ser omnívora, es decir, por su diversidad en cuanto al tipo de recursos (vegetales/animales) consumidos, ¿la relación Sr/Ca también funciona para indicar posición trófica o, en el mejor de los casos, para conocer si el componente vegetal o cárnico predominó en la dieta? Si se toman en cuenta exclusivamente los valores absolutos de Sr/Ca, entonces la respuesta es un contundente “no”. ¿Ello significa la inutilidad de los análisis de elementos traza como un medio para conocer las características de la paleodieta humana? “no”. Significa tan sólo que en el caso de los omnívoros, siendo los seres humanos el caso extremo, los valores Sr/Ca no pueden interpretarse del mismo modo que para los vertebrados con hábitos alimenticios muy especializados y consumidores de un rango estrecho de recursos.

Así como para las relaciones tróficas entre especies de flora y fauna de un ecosistema dado la relación Sr/Ca funciona siempre y cuando se tenga conocimiento previo de las relaciones tróficas entre especies, de igual forma el estudio de elementos traza, para que sea útil, demanda el conocimiento previo de la distribución geográfica, geológica y biótica de alcalino térreos en el hábitat donde residió la población humana. También, mediante

análisis arqueozoológicos, paleobotánicos, conocer, con todo y el sesgo diagenético, algunos de los recursos aprovechados por la sociedad; en la medida de lo posible investigar sobre la forma en que eran preparados los alimentos, pues tales prácticas son capaces de incidir en los niveles de alcalino térreos aportados por la dieta, siendo el maíz un buen ejemplo de ello.

Estas precauciones son necesario tomarlas en cuenta puesto que, a diferencia de los vertebrados especializados (herbívoros o carnívoros) sus concentraciones óseas de Sr/Ca están en correspondencia con la posición trófica de la especie y con la proporción de tejido animal/vegetal consumido, en el caso de los seres humanos sus niveles óseos de Sr/Ca indican únicamente los de la dieta, sin correspondencia alguna con la proporción de recursos animales/vegetales consumidos. Si los niveles Sr/Ca no distinguen de forma automática entre tipo de alimento, entonces ¿qué parte de la dieta distinguen los valores Sr/Ca? Pues al alimento con mayor contenido mineral, mismo que en términos cuantitativos pudo predominar o no en la dieta y que pudo ser de origen vegetal o animal, según las características particulares de cada sociedad estudiada.

Sin duda, lo antes dicho constituye la más importante modificación o limitación, a los alcances interpretativos que le fueron atribuidos cuando se dio origen a la técnica en los años 70s del siglo pasado. Ahora el estudio de elementos traza se ha convertido en un medio más para el análisis de la paleodieta. No es considerado ya como el mejor método, o el que proporcionará la respuesta definitiva. Tampoco ha vuelto obsoletos o innecesarios a los estudios paleozoológicos y paleobotánicos, por el contrario, éstos han conservado su carácter de imprescindibles, e incluso lo han incrementado en virtud de las limitaciones que con el tiempo se le reconocieron a la técnica de los elementos traza antes señaladas.

Si bien los estudios que tienen como base a los valores Sr/Ca enfrentan las limitaciones ya señaladas (no posición trófica, no tipo de alimento dominante), el Ba y en particular los niveles Ba/Ca enfrentan un panorama muy diferente, pues gozan de pleno consenso entre los especialistas como el parámetro efectivo para identificar sociedades donde los recursos acuáticos significaron parte fundamental de su subsistencia. Sin embargo, su eficacia disminuye cuando se busca reconocer matices, es decir, conforme tiende a haber un equilibrio en la ingesta de recursos acuáticos y terrestres.

Tras lo comentado en el Capítulo IV, queda claro que las investigaciones de paleodietas por elementos traza realizadas en poblaciones prehispánicas mesoamericanas son muy heterogéneas, tanto en su metodología, sus enfoques, sus expectativas, el alcance de sus planteamientos. Por un lado, existen investigaciones cuyo proceder es producto innegable del momento histórico durante el cual se gestaron, por ejemplo el estudio de colecciones óseas de Chalcatzingo y de varios sitios del estado de Oaxaca, incluidas en los trabajos pioneros de la técnica. Los supuestos de un mínimo efecto diagenético sobre los niveles óseos de estroncio, y de una mínima variabilidad por edad, sexo y región esquelética (tipo de tejido óseo) en las concentraciones de Sr, son característicos de la época. En retrospectiva, los planteamientos respecto a la dieta y su relación con el estatus social, formuladas por esos estudios para los grupos mesoamericanos analizados, aún quedan por corroborarse.

Con el tiempo, al igual que ocurrió en otras colecciones del mundo, se aplicó un enfoque multielementos que consideró al Mg y al Zn como marcadores tróficos útiles para

discriminar entre el consumo de vegetales y proteína animal respectivamente. Sin embargo los resultados, vale reconocer, han sido inconsistentes.

Por otro lado, aunque los investigadores reconocen de manera explícita su constante preocupación por los efectos de la diagénesis ósea sobre los niveles *antemortem* de alcalino térreos, y han aplicado diversos métodos para estimarla y contrarrestarla, en la práctica se observa mayor énfasis para atacar la diagénesis de tipo físico, descuidando la de tipo químico, tan importante como la primera.

Llama la atención que estudios mesoamericanos relativamente recientes consideren como válidos algunas de las premisas que dieron sustento a los estudios pioneros. Por ejemplo, en lo que toca al poco efecto de la edad del individuo en los niveles óseos de Sr, lo que se ha traducido en el análisis de colecciones óseas que incluyen muestras de sujetos subadultos y adultos. Otro ejemplo, considerar a la relación Sr/Ca como parámetro de la proporción de tejido animal/vegetal incluido en la dieta, por ende los valores elevados se asocian automáticamente a un predominio en el consumo de plantas y valores bajos a uno de carne. Tal proceder es incorrecto, pues los niveles Sr/Ca corresponden al del alimento de mayor contenido mineral, sin importar la cantidad relativa en la que fue incorporado a la dieta. Consecuencia de lo anterior, no sorprende que muy pocas investigaciones contemplen la variabilidad de alcalino térreos del maíz, provocada según el tratamiento aplicado previo a su consumo, cuyos niveles Sr/Ca pueden dominar los de la dieta y del tejido óseo, o en el peor de los casos pasar inadvertidos, pues prevalecen los de otros alimentos.

La referida particularidad del maíz basta para demostrar la necesaria realización conjunta y complementaria de las dos técnicas de paleodieta por análisis químicos de los

restos óseos: isótopos estables de carbono y nitrógeno, y elementos traza. Así, al contrastar el comportamiento de los altos o bajos niveles Sr/Ca y su correspondencia con los de ^{13}C , se dispondría de mayores elementos de juicio para proponer, bajo bases más firmes, el consumo relativo del maíz y la forma en que su preparación incidió en las concentraciones Sr/Ca de la dieta y del tejido óseo.

No obstante el carácter heterogéneo de los estudios de paleodieta por elementos traza realizados en colecciones mesoamericanas, puede concluirse que sin excepción todos han sido valiosos, pues con el genuino interés de abonar al conocimiento de las sociedades prehispánicas, incursionaron en un campo nuevo e hicieron notables esfuerzos por diversificar las fuentes de información disponibles. Dado que en el campo convergen varias disciplinas, ello implicó el compromiso de adquirir la formación académica necesaria y trabajar con diverso tipo de profesionistas. La publicación de los resultados de cada nueva investigación de paleodieta fue catalizador para el inicio de otra, a realizarse en circunstancias (sitio, geografía, cronología, medio ambiente, subsistencia) y por personal diferentes.

Hoy día, los estudios ya realizados cobrarán aún mayor relevancia en la medida que seamos capaces de reconocer con objetividad sus virtudes, aciertos, restricciones y carencias, lo cual nos permitirá ponderar de igual modo sus conclusiones. Para lograrlo, el interesado (antropólogo físico de preferencia) debe asumir el compromiso pleno de formarse conocimiento suficiente de lo que implica un análisis de elementos traza, contrastando las distintas valoraciones que sobre sus requerimientos metodológicos y sus alcances se describen en la literatura.

IncurSIONAR en la técnica de los elementos traza no siempre es fácil, requiere de cierta especialización, y cuando se logra a veces los resultados no permiten objetivamente hacer planteamientos categóricos sobre las características de la dieta antigua. Por lo general, la interpretación de los datos obtenidos sirve para corroborar y complementar las generadas por otros medios (análisis faunísticos, botánicos, de isótopos). Por ello, ante las dificultades técnicas y metodológicas que deben enfrentarse y resolverse (en particular con la diagénesis), no falta quienes piensen (ver Radosevich, 1993: 317-319; Burton *et al.*, 2003: 88, 89), que el esfuerzo, tiempo y dinero detrás de un estudio de elementos traza, suele no verse correspondido con la cantidad y calidad de la información obtenida, convirtiéndose tales estudios en no necesariamente los mejores para inferir la dieta antigua.

Sin embargo, si se dispone del conocimiento y de los recursos técnicos necesarios, no hay razón para privarse de contribuir con otro elemento de discusión al conocimiento de las estrategias de subsistencia, implementadas por los grupos humanos para el aprovechamiento de su medio ambiente, y al impacto de éstas en la estructura social. A semejante esfuerzo subyacen la imprescindible comunicación y trabajo conjunto entre los diversos profesionistas, cuyas disciplinas convergen en el campo de la paleodieta por análisis de elementos traza. En la medida que los antropólogos seamos capaces de comunicarnos, en sus propios términos, con los otros profesionistas, estaremos en condiciones de mirar más allá de las complicaciones técnicas implícitas en los análisis químicos, y a no perder el propósito que motivó nuestro interés en el campo: la dieta como una manifestación cultural del comportamiento humano.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrams, Steven A. e Ian J. Griffin (2004). "Microminerals and bone health". En: Michael F. Holick y Bess Dawson-Hughes (eds.). *Nutrition and bone health*. Humana Press, EUA, pp: 377-387.
- Armelagos, George J.; Barret Brenton; Michael Alcorn; Debra Martin y Dennis P. Vangerven (1989). "Factors affecting elemental and isotopic variation in prehistoric human skeletons". En: Douglas T. Price (ed.), *The chemistry of prehistoric human bone*. Cambridge University Press, Gran Bretaña, pp: 230-244.
- Blitz, Jennifer Ayn (1995). *Dietary variability and social inequality at Monte Alban, Oaxaca, México*. Tesis Doctoral; University Microfilms International, Ann Arbor Michigan, EUA, 361 pp.
- Bogden, John D. (2000). "The essential trace elements and minerals". En: J. D. Bogden y L. M. Klevay (eds.), *Clinical nutrition of the essential trace elements and minerals*. Humana Press, EUA, pp: 3-9.
- Bouglè, D.L; J.P. Sabatier; G. Guaydier-Souquières; F. Guillon-Metz; D. Laroche; P. Jauzac y F. Bureau (2004). "Zinc status and bone mineralisation in adolescent girls". *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18:17-21.
- Brown, A. B. (1973). *Bone strontium content as a dietary indicator in human skeletal populations*. Tesis doctoral, Universidad de Michigan, Ann Arbor, EUA.
- Burton, James H. y T. Douglas Price (1990). "The ratio of barium to strontium as a paleodietary indicator of consumption of marine resources". *Journal of Archaeological Science*, 17(5): 547-557.
- y ——— (1999). "Evaluation of bone strontium as a measure of seafood consumption". *International Journal of Osteoarchaeology*, 9(4): 233-236.
- y ——— (2000). "The use and abuse of trace elements for paleodietary research". En: Stanley H. Ambrose y M. Ann Katzenberg (eds), *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*. Advances in Archaeological and Museum Science, vol. 5. Kluwer Academic/Plenum Publishers, EUA, pp: 159-171.

- ; T. Douglas Price y William D. Middleton (1999). “Correlation of bone Ba/Ca y Sr/Ca due to biological purification of calcium”. *Journal of Archaeological Science*, 26(6): 609-616.
- ; T. Douglas Price; L. Cahue y Lori E. Wright (2003). “The use of barium and strontium abundances in human skeletal tissues to determine their geographic origins”. *International Journal of Osteoarchaeology*, 13(1-2): 88-95.
- y Lori E. Wright (1995). “Nonlinearity in the relationship between bone Sr/Ca and diet: paleodietary implications”. *American Journal of Physical Anthropology*, 96(3): 273-282.
- Byrne Kevin B. y David C. Parris (1987). “Reconstruction of the diet of the Middle Woodland Amerindian populations at Abbot Farm by trace-elements analysis”. *American Journal of Physical Anthropology*, 74(3): 373-384.
- Child, A. M. (1995a). “Microbial taphonomy of archaeological bone”. *Studies in Conservation*, 40(1): 19-30.
- (1995b). “Towards an understanding of the microbial decomposition of archaeological bone in the burial environment”. *Journal of Archaeological Science*, 22(2): 165-174.
- Comar, C. L.; R. Scott Russell y R. H. Wasserman (1957). “Strontium-calcium movement from soil to man”. *Science*, 126: 485-492.
- Durán, Diego (1984). *Historia de las Indias de Nueva España e Islas de la Tierra Firme*. Porrúa, 2 Tomos, México.
- Ezzo, Joseph A. (1992). “A test of diet versus diagenesis at Ventana Cave, Arizona”. *Journal of Archaeological Science*, 19(1): 23-37.
- (1994a). “Putting the ‘chemistry’ back into archaeological bone chemistry analysis: modeling potential paleodietary indicators”. *Journal of Anthropological Archaeology*, 13(1): 1-34.
- (1994b). “Zinc as paleodietary indicator: an issue of theoretical validity in bone-chemistry analysis”. *American Antiquity*, 59(4): 606-621.

- ; Clark Spencer Larsen y James H. Burton (1995). “Elemental signatures of human diets from the Georgia Bight”. *American Journal of Physical Anthropology*, 98(4): 471-481.
- Gilbert, Cheryl; Judith Sealy y Andrew Sillen (1994). “An investigation of barium, calcium and strontium as palaeodietary indicators in the Southwestern Cape, South Africa”. *Journal of Archaeological Science*, 21(2): 173-184.
- Grupe, Gisela (1988). “Impact of the choice of bone samples on trace element data in excavated human skeletons”. *Journal of Archaeological Science*, 15(2): 123-129.
- Fairweather-Tait, Susan y Richard F. Hurrell (1996). “Bioavailability of minerals and trace elements”. *Nutrition Research Reviews*, 9: 295-324.
- Hoppe, K.; P. Koch y T. Furutani (2003). “Assessing the preservation of biogenic strontium in fossils bones and tooth enamel”. *International Journal of Osteoarchaeology*, 13(1): 20-28.
- Katzenberg, M. Anne; D. Ann Herring y Shelley R. Saunders (1996). “Weaning and infant mortality: evaluating the skeletal evidence”. *Yearbook of Physical Anthropology*, 39: 177-199.
- Klepinger, Linda L. (1990). “Magnesium ingestion and bone magnesium concentration in paleodietary reconstruction: cautionary evidence from an animal model”. *Journal of Archaeological Science*, 17(5): 513-517.
- Lambert, Joseph B.; Sharon M. Vlasak; Anne C. Thometz y Jane E. Buikstra (1982). “A comparative study of the chemical analysis of ribs and femurs in Woodland populations”. *American Journal of Physical Anthropology*, 59(3): 289-294.
- ; Sharon Vlasak Simpson; Carol B. Szpunar y Jane E. Buikstra (1985). “Bone diagenesis and dietary analysis”. *Journal of Human Evolution*, 14: 477-482.
- ; Liang Xue y Jane E. Buikstra (1989). “Physical removal of contaminative inorganic material from buried human bone”. *Journal of Archaeological Science*, 17(4): 427-436.
- ; Jane M. Weydert; Sloan R. Williams y Jane E. Buikstra (1990). “Comparison of methods for the removal of diagenetic material in buried bone”. *Journal of Archaeological Science*, 17(4): 453-468.

- Landa, Fray Diego de (1982). *Relación de las cosas de Yucatán*. México, Porrúa.
- Lee-Thorp, Julia A. (2000). "Preservation of biogenic carbon isotopic signals in plio-pleistocene bone and tooth mineral". En: Stanley H. Ambrose y M. Ann Katzenberg (eds), *Biogeochemical approaches to paleodietary analysis*. Advances in Archaeological and Museum Science, vol. 5. Kluwer Academic/Plenum Publishers, EUA, pp: 89-115.
- Manzanilla, Linda; Samuel Tejada y Juan Carlos Martínez (1996). "Implicaciones del análisis de calcio, estroncio y zinc en el conocimiento de la dieta y la migración en Teotihuacán". *Anales de Antropología*, 33: 13-28, 1996-1999.
- Mays, Simon (2003). "Bone strontium: calcium ratios and duration of breastfeeding in a Medieval skeletal population". *Journal of Archaeological Science*, 30(7): 731-741.
- Mertz, Walter (1981). "The essential trace elements". *Science*, 213: 1332-1338.
- Nalda, Enrique; Samuel Tejada; Adriana Velázquez y Graciela Zarazúa (1999). "Paleodieta en Dzibanché y Kohunlich: diferencias y tendencias preliminares". *Arqueología*, 2da. época, 21: 35-44.
- Nielsen, Forrest H. (2000). "Possibly essential trace elements". En: J. D. Bogden y L. M. Klevay (eds.), *Clinical nutrition of the essential trace elements and minerals*. Humana Press, EUA, pp: 11-36.
- Nielsen, Pors S. (2004). "The biological role of strontium". *Bone*, 35: 583-588.
- Nielsen-Marsh, Christina M. y Robert E. Hedges (2000a). "Patterns of diagenesis in bone I: the effects of site environments". *Journal of Archaeological Science*, 27(12): 1139-1150.
- y ——— (2000b). "Patterns of diagenesis in bone II: Effects of acetic acid treatment and the removal of diagenetic CO₃⁻²". *Journal of Archaeological Science*, 27(12): 1151-1159.
- Price, Douglas T. (1989). "Bones, chemistry, and the human past". En: Douglas T. Price (ed.), *The chemistry of prehistoric human bone*. Cambridge University Press, Gran Bretaña, pp: 1-9.
- ; Jennifer Blitz; James Burton y Joseph A. Ezzo (1992). "Diagenesis in prehistoric bone: problems and solutions". *Journal of Archaeological Science*, 19(5): 513-529.

- ; Margaret J. Scoeninger y George J. Armelagos (1985). “Bone chemistry and past behavior: an overview”. *Journal of Human Evolution*, 14: 419-447.
- Radosevich, Stefan C. (1993). “The six deadly sins of trace element analysis: a case of wishful thinking in science”. En: Mary K. Sandford (ed.), *Investigations of ancient human tissue: chemical analysis in anthropology*. Gordon and Breach, EUA, pp: 269-332.
- Runia, Lex T. (1987). “Strontium and calcium distribution in plants: effect on palaeodietary studies”. *Journal of Archaeological Science*, 14(6): 599-608.
- Sahagún, Bernardino de (1989). *Historia general de las cosas de Nueva España*. Porrúa, Colección Sepan Cuantos, núm. 300, México, 1093 pp.
- Salmenperä, Leena (1997). “Detecting subclinical deficiency of essential trace elements in children with special reference to zinc and selenium”. *Clinical Biochemistry*, 30(2): 115-120.
- Sandford, Mary K. y David S. Weaver (2000). “Trace element research in anthropology: new perspectives and challenges”. En: M. Ann Katzenberg y Shelley R. Saunders (eds.), *Biological anthropology of the human skeleton*. Wiley-Liss, EUA, pp: 329-350.
- Schoeninger, Margaret J. (1979). “Diet and status at Chalcatzingo: some empirical and technical aspects of strontium analysis”. *American Journal of Physical Anthropology*, 51(3): 295-310.
- (1985). “Trophic levels effects on $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in bone collagen and strontium levels in bone mineral”. *Journal of Human Evolution*, 14: 515-525.
- y Christopher S. Peebles (1981). “Effect of mollusc eating on human bone strontium levels”. *Journal of Archaeological Science*, 8(4): 391-397.
- Schroeder, Henry A.; Isabel H. Tipton y Alexis P. Nason (1972). “Trace metals in man: strontium and barium”. *Journal of Chronic Diseases*, 25(9): 491-517.
- Sealy, Judith C. y Andrew Sillen (1988). “Sr and Sr/Ca in marine and terrestrial foodwebs in the Southwestern Cape, South Africa”. *Journal of Archaeological Science*, 15(4): 425-438.
- Sillen, Andrew (1981). “Strontium and diet at Hayonim Cave”. *American Journal of Physical Anthropology*, 56(2): 131-137.

- (1988). “Elemental and isotopic analyses of mammalian fauna from Southern Africa and their implications for paleodietary research”. *American Journal of Physical Anthropology*, 76(1): 49-60.
- (1989). “Diagenesis of the inorganic phase of cortical bone”. En: Douglas T. Price (ed.), *The chemistry of prehistoric human bone*. Cambridge University Press, Gran Bretaña, pp: 211-229.
- y Maureen Kavanagh (1982). “Strontium and paleodietary research: a review”. *Yearbook of Physical Anthropology*, 25: 67-90.
- ; Judith C. Sealy y Nikolaas van der Merwe (1989). “Chemistry and paleodietary research: no more easy answers”. *American Antiquity*, 54(3): 504-512.
- y P. Smith (1984). “Weaning patterns are reflected in strontium-calcium ratios of juvenile skeletons”. *Journal of Archaeological Science*, 11(1): 237-245.
- Toots, H. y M. R. Voorhies (1965). “Strontium in fossil bones and the reconstruction of food chains”. *Science*, 149: 854-855.
- Tuross, Noreen; Anna K. Behrensmeyer y E. D. Eanes (1989). “Strontium increases and crystallinity changes in taphonomic and archaeological bone”. *Journal of Archaeological Science*, 16(6): 661-672.
- Vishwanath M., Sardesai (2003). *Introduction to clinical nutrition*. Marcel Dekker, EUA, 565 pp.
- White, Christine D. y Henry P. Schwarcz (1989). “Ancient maya diet: as inferred from isotopic and elemental analysis of human bone”. *Journal of Archaeological Science*, 16(5): 451-474.