

Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Filosofía y Letras  
Instituto de Investigaciones Antropológicas

Diagénesis en esqueletos humanos de una población colonial  
del siglo XVI: implicaciones para la investigación paleodietaria

Tesis para obtener el grado de maestro en antropología  
Presenta  
Arturo Gómez Serrano

Director: Dr. Carlos Serrano Sánchez

Asesores:

Biol. Serafín Sánchez Pérez

Antrop. Andrés del Ángel Escalona

Dr. Jesús A. Arenas Alatorre

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.

## Agradecimientos

La conclusión de esta labor se debió a la obra colectiva y gentil de diferentes personas que tuvieron constantemente una participación directa o indirecta en las diversas etapas, por ello, de manera sincera, a todos les reconozco profundamente su apoyo.

Agradezco a mi familia. El esfuerzo de mis padres Lourdes Serrano Caballero y Roberto Gómez García ha sido muy importante también para mi formación en esta profesión, porque su apoyo en todos los sentidos me ha permitido lograr objetivos dentro de la antropología. También mis hermanos Roberto Gómez Serrano y Gustavo Gómez Serrano han sido significativos en la culminación de este escrito porque igualmente colaboraron solucionando diversos aspectos. A Pía Moya Honores quiero también manifestarle mi gratitud por dos razones; primero, por su ayuda durante todo lo que involucró la maestría incluyendo el desarrollo de la presente tesis; y segundo, porque el hecho de estar juntos y compartir la vida diaria me mantiene motivado en otros ámbitos de la vida.

La dirección que recibí por parte del Dr. Carlos Serrano Sánchez fue primordial, su enseñanza me permitió delimitar y definir la estructura del trabajo y sus comentarios y lecturas en el transcurso del mismo fueron parte sustancial en el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de la investigación. Sin duda que su instrucción me dejó una gran experiencia en mi formación como antropólogo físico. Le agradezco profundamente también el apoyo, en diversos aspectos, que me brindó en los últimos años, pues en buena parte esto me facilitó finalizar la investigación.

La asistencia del Biol. Serafín Sánchez Pérez me permitió relacionar más los objetivos desde la antropología y vincular este campo con la edafología; le agradezco su siempre accesible orientación y enseñanza de ya casi 10 años, y sobre todo su ayuda en el análisis de las muestras de suelo mientras estuve en el Laboratorio de Suelos y Sedimentos de la Escuela Nacional de Antropología e Historia, así como su colaboración en la interpretación de los resultados. Igualmente, quiero expresar mi reconocimiento al Dr. Jesús A. Arenas Alatorre por la disposición que continuamente mostró para la realización de los análisis de hueso en el Laboratorio Central de Microscopía del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y por su valiosa asesoría en esa parte importante del desarrollo de la investigación. Además, fue primordial la cooperación de la Ing.

Cristina Zorrilla Cangas, del Ing. Químico Manuel Aguilar y de Diego Quiterio del mismo Instituto durante el proceso de análisis de las muestras óseas.

Asimismo, agradezco al Antrop. Andrés del Ángel Escalona su contribución en los análisis estadísticos, los cuales me permitieron darle estructura a los resultados para la interpretación final; su ayuda, recomendaciones y sugerencias para mejorar la presentación de este trabajo igualmente fueron de gran utilidad. También le agradezco su apoyo en los últimos años porque me ha posibilitado darle conclusión a esta tesis.

Quiero mencionar al Arqlgo. Osvaldo Sterpone, adscrito al Centro INAH Hidalgo, por brindarme la posibilidad de estudiar los entierros excavados dentro del proyecto a su cargo “Geografía Histórica: investigación acerca del urbanismo, demografía y medioambiente en el norte de la cuenca de México y regiones periféricas”, y por proporcionarme la información de campo necesaria; sus comentarios en materia arqueológica en el transcurso del trabajo fueron muy pertinentes y relevantes.

Agradezco al A. F. Jorge A. Talavera González por permitirme trabajar con los materiales que se excavaron bajo su dirección dentro del proyecto señalado. Por otra parte, quiero expresar mi gratitud al Antrop. Xabier Lizarraga Cruchaga y al Antrop. Francisco Ortiz Pedraza por proporcionarme todas las facilidades para el análisis de una de las colecciones óseas resguardadas por la Dirección de Antropología Física del Instituto Nacional de Antropología e Historia; también agradezco al personal de la Osteoteca, en especial al Antrop. David Volcanes por su ayuda en la revisión de los materiales óseos. Además, quisiera manifestarle mi reconocimiento al Antrop. Alberto Prado Gómez por su apoyo en el análisis de los restos óseos contemporáneos.

Asimismo, un sincero agradecimiento al Dr. Zaid Lagunas Rodríguez y al Mtro. Enrique Villamar Becerril por dedicar parte de su tiempo a leer esta investigación y por las observaciones que fueron de gran beneficio para su presentación final.

Le expreso mi gratitud a la UNAM, por la oportunidad que me dio para seguir avanzando en mi formación académica. Para mí significó mucho ser alumno de esta prestigiosa institución.

Agradezco además al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me otorgó de septiembre de 2001 a agosto de 2003, con el número de registro 165680, así como a la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP) de la UNAM, por

la beca complementaria que me concedió de septiembre de 2001 a julio de 2003 (OF. DGEP/SPIAP/PB/2585/2001).

Por último, debo agradecer a la Facultad de Filosofía y Letras y al Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM, a través de su Posgrado en Antropología; en especial le manifiesto mi gratitud a sus coordinadores, la Dra. Ana Bella Pérez Castro y el Dr. Guido Münch Galindo, y también dentro del posgrado agradezco a Luz María Téllez, Hilda Cruz y Teresa García por su importante colaboración y por su disposición en todo lo relacionado con mis estudios.

# Contenido

Agradecimientos .....	5
Introducción .....	9
Capítulo I	
<i>Problema de investigación</i> .....	12
1. Planteamiento .....	12
2. Justificación .....	13
3. Objetivos e hipótesis.....	15
Capítulo II	
<i>Antecedentes</i> .....	17
1. Estudios de diagénesis y paleodieta .....	17
Capítulo III	
<i>Marco conceptual</i> .....	41
1. Algunos aspectos relacionados con la dieta humana .....	41
A. Fisiología y dieta .....	41
B. Dieta en la época prehispánica .....	45
C. Dieta y patología .....	49
2. Biología del hueso .....	53
3. Suelos .....	58
4. Tafonomía ósea .....	65
5. Diagénesis .....	68
6. Paleodieta .....	70
Capítulo IV	
<i>Comunidad de Los Olmos, Estado de Hidalgo</i> .....	75
1. Ubicación .....	75
2. Historia .....	76
A. Condiciones de salud y nutrición de los pobladores de Tetetzontilco	80
3. Ambiente .....	83
A. Clima .....	83
B. Geomorfología .....	84
C. Suelos .....	87
D. Vegetación .....	89
Capítulo V	
<i>Desarrollo analítico: restos óseos</i> .....	93
1. Excavación .....	93
2. Muestra ósea .....	96
3. Pruebas físicas .....	102

A. Porosidad ósea .....	102
B. Densidad ósea .....	103
4. Microscopía electrónica de barrido (SEM) .....	104
5. Espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS) .....	108
6. Difracción de rayos X .....	109
7. Procedimiento estadístico .....	110
 Capítulo VI	
<i>Desarrollo analítico: suelo</i> .....	112
1. Muestreo .....	112
2. Preparación de la muestra .....	115
3. Análisis físicos .....	116
A. Densidad aparente .....	116
B. Densidad real .....	118
C. Porosidad .....	118
D. Textura .....	120
4. Análisis químicos .....	121
A. Potencial de hidrógeno .....	121
B. Materia orgánica .....	123
C. Conductividad eléctrica .....	124
D. Capacidad de intercambio catiónico total .....	125
5. Espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS) .....	126
 Capítulo VII	
<i>Resultados y su discusión</i> .....	128
1. Factores ambientales relacionados con la diagénesis del hueso .....	128
A. Clima .....	128
B. Geomorfología .....	130
C. Vegetación .....	131
2. Características físicas y químicas de los suelos en Los Olmos .....	132
A. Característica física del suelo .....	133
B. Característica química del suelo .....	135
3. Porosidad y densidad ósea .....	138
A. Porosidad .....	138
B. Densidad .....	144
4. Elementos químicos del suelo .....	146
5. Elementos químicos del hueso .....	148
6. Implicaciones de la diagénesis en la investigación paleodietaria .....	158
 <i>Consideraciones finales</i> .....	164
 <i>Bibliografía</i> .....	168

## Introducción

---

El estudio de los enterramientos humanos es parte fundamental de la osteología antropológica para la explicación de la diversidad de nuestra especie a través del tiempo. Asimismo los análisis multivariados en esqueletos de origen arqueológico permiten conocer la distribución geográfica, las relaciones biológicas, los perfiles físicos, los procesos de mestizaje y las prácticas culturales de nuestros ancestros.

En los últimos años han aumentado los estudios en restos óseos con la finalidad de analizar su composición química como un medio para reconstruir las características de la dieta de las poblaciones antiguas. En este sentido y debido a la controversia suscitada por este tipo de estudios en cuanto a la procedencia biogénica de los iones que se cuantifican, el objetivo de este trabajo es hacer estudios de la química y física del tejido óseo para evaluar la diagénesis y discutir las implicaciones de este fenómeno en las aproximaciones de paleodietas.

La diagénesis incluye todos los cambios físicos, químicos y biológicos que ocurren en el hueso durante el enterramiento, sobre todo cuando comienzan las reacciones químicas por la interacción de las propiedades del hueso y las características físicas y químicas del suelo. La diagénesis está influenciada por factores intrínsecos y extrínsecos; los primeros se refieren al propio hueso, como la sección anatómica, el tamaño, su porosidad, su estructura química y la edad al momento de la muerte; y los segundos tienen relación con el ambiente de enterramiento como el pH (potencial de hidrógeno) del suelo, la cantidad de agua, la acción bacteriana, el clima; en general todos los fenómenos relacionados con el contexto de depósito. La diagénesis del hueso involucra pérdida de colágeno y cambios en el tamaño y composición de los cristales de hidroxiapatita.

Para esta investigación se utilizaron dos colecciones óseas excavadas en la actual comunidad de Los Olmos, en Hidalgo, dentro del proyecto "Geografía Histórica". Se trata de individuos enterrados a finales del siglo XVI asociados a una capilla franciscana. Esta población vivió todos los cambios políticos, sociales y económicos debidos a la conquista española, por lo que la muestra osteológica destaca como fuente valiosa de información antropológica.



Es importante señalar que después del planteamiento del problema y los objetivos de investigación, incluidos al inicio de este trabajo, el capítulo II está dedicado a la revisión de algunos trabajos generados en las últimas cuatro décadas; en éstos los autores reflexionan sobre la composición química de los huesos y algunos se concentran en la evaluación de paleodietas y otros se abocan a la diagénesis.

En el capítulo III se desarrollan las bases conceptuales utilizadas a fin de ubicar el concepto de diagénesis dentro de este trabajo antropofísico, considerando además la biología del hueso y aspectos de la alimentación humana. También se hace referencia a otras áreas de estudio que están relacionadas con la diagénesis, como la tafonomía, y se enmarca la importancia del suelo desde la perspectiva edafológica al describir sus características físicas y químicas como uno de los elementos principales de la diagénesis ósea.

El capítulo IV incluye la descripción del área de excavación tomando en cuenta su ubicación dentro del Estado de Hidalgo, su historia para hacer énfasis en los trabajos arqueológicos ya realizados, en los cuales se ha descrito la trascendencia antropológica del contexto como consecuencia de la gran cantidad de enterramientos descubiertos durante los últimos diez años. Se hace referencia al ambiente del lugar remarcando que el clima, por medio de la lluvia, es uno de los factores responsables de la condición química y física de los esqueletos al momento de la excavación.

En la sección dedicada al desarrollo analítico, capítulos V y VI, se puntualizan los procedimientos de excavación y análisis para los restos óseos, por un lado, y para las muestras de suelo, por el otro. Se detallan los procedimientos metodológicos empleados para explicar los dos parámetros diagenéticos aquí considerados: la porosidad y la densidad ósea, además de las especificaciones de los análisis físicos y químicos realizados al suelo: textura, pH, materia orgánica, conductividad eléctrica e intercambio catiónico. También se describen otras técnicas utilizadas en hueso y en suelo: microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS) y difracción de rayos X (DRX).

En el capítulo VII se presentan y discuten los resultados relacionando la condición química y física de los huesos con la física y química del suelo, considerando cómo el ambiente fue un factor fundamental en la diagénesis ósea. Finalmente, se reflexiona cómo puede influir la diagénesis en los estudios de dietas antiguas por medio de la cuantificación de elementos químicos. Se destaca que la concentración de ciertos elementos químicos en la sección estudiada de la diáfisis de los fémures fue heterogénea, lo cual implica que es necesario seguir obteniendo parámetros de comparación en diferentes secciones del hueso tanto en colecciones óseas modernas como en las de origen arqueológico, y utilizar la metodología adecuada desde el momento de la excavación, a fin de tener un control de las muestras de suelo y las muestras de hueso.

# Capítulo I. Problema de investigación

---

## 1. Planteamiento

Dentro de los estudios antropofísicos dirigidos al entendimiento y explicación de la vida de las sociedades del pasado, la osteología antropológica ha incluido análisis de paleodieta por medio de la cuantificación de algunos elementos químicos presentes en los huesos antiguos.

Desde tiempos antiquísimos todas las poblaciones humanas han estado en interacción constante con su ambiente próximo, (sobre todo, y haciendo referencia a las poblaciones prehispánicas), para cubrir sus necesidades primarias de sobrevivencia. Por medio de las fuentes etnohistóricas sabemos que dichas sociedades obtenían sus alimentos del entorno inmediato; se tratara de dietas vegetales o dietas animales, siempre procuraron la explotación sistemática de los recursos naturales a su disposición.

En este sentido, el fundamento principal de los estudios paleodietarios reside en que durante la vida, al ingerir carne y vegetales, la fisiología del organismo humano hace que el tejido óseo retenga constantemente algunos elementos químicos presentes en estos alimentos, como el cinc (Zn), fósforo (P), calcio (Ca), bario (Ba), estroncio (Sr) y cobre (Cu), entre otros; y la cuantificación de estos elementos en los huesos antiguos puede aproximarnos al tipo de alimentación, ya sea vegetal o animal. No obstante, puede suceder que aunque el estudio de elementos químicos proporcione un acercamiento a la alimentación básica de un grupo humano, el funcionamiento de por sí complicado de la química del hueso, aunado a la diagénesis de los esqueletos humanos en su contexto de enterramiento, altere las cantidades originales. El hueso es susceptible de cambiar su condición química tanto en el organismo vivo como cuando está expuesto a condiciones de enterramiento severas, es un material muy maleable que responde rápidamente al ambiente, pudiendo tener lugar un intercambio de elementos químicos con el suelo del enterramiento; por tal motivo, es necesario hacer una

lectura de la posible acción diagenética que se haya producido sobre el hueso que se estudiará (Malgosa y Subirà 1997).

Cada estudio debería intentar identificar el efecto probable de la diagénesis, si el objetivo es aislar las verdaderas interpretaciones dietarias. El examen de los efectos de la diagénesis sobre los niveles minerales del hueso es el aspecto más crítico de los análisis químicos de hueso actualmente (Buikstra *et al.* 1989; Rodríguez 2004 y Villamar 2006).

Los cambios diagenéticos son aparentes en la mayoría de los estudios arqueológicos del hueso y no pueden ser pasados por alto. Es claro que la evidencia de una variedad de contextos arqueológicos debería ser considerada con la finalidad de comprender los efectos de la diagénesis en la reconstrucción de las dietas pasadas.

## 2. Justificación

En antropología física una de las principales fuentes de estudio para la explicación de la variabilidad humana han sido los análisis osteológicos. Los esqueletos excavados en diversos contextos arqueológicos aportan información del ambiente natural que habitaron las poblaciones pasadas; sin embargo, es indispensable conocer las prácticas funerarias y parte de la historia *post mortem* de los cadáveres.

La forma en que se depositaba el cadáver, su orientación, el atavío funerario, las ofrendas asociadas, su contexto general, así como las evidencias de los actos ceremoniales y rituales, se relacionan con las creencias de los antiguos habitantes, las tradiciones en sus costumbres funerarias, sus concepciones cosmogónicas y religiosas, además de otros aspectos de la vida social de los pueblos del pasado. Las variaciones de los aspectos mortuorios reflejan las entidades sociales del muerto; es decir, la vida social del individuo se refleja en el tratamiento que se le dio a su cuerpo después de muerto (Cabrera 1999: 503).

Debemos agregar que el hueso humano es un tejido con una matriz colágena impregnada con sales minerales, especialmente fosfatos de calcio. Los huesos proporcionan un almacén de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y otros minerales que ayudan a mantener el balance mineral. La composición química de la estructura mineral del hueso fresco es de la forma general  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$  (hidroxiapatita). Estas sales forman cristales que miden 20 por 3-7 nm (Ganong 1986). La hidroxiapatita puede cambiar su estructura, perder componentes o absorber minerales como consecuencia de los intercambios de elementos químicos entre el hueso y el suelo durante el tiempo de enterramiento.

En esta relación suelo-hueso, aunque sabemos que hay variaciones de acuerdo con el lugar geográfico, las características biológicas de los restos óseos y el tiempo de enterramiento siguen el comportamiento siguiente: en general, 20% del componente orgánico del hueso se destruye y los cristales de fosfato de calcio cambian su composición, modificando su estructura original. Aunque hay variables en la fracción física y química de los suelos, para Behrensmeyer (1991) carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), y óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) penetran gradualmente al hueso reemplazando los minerales originales y el espacio dejado por la materia orgánica, incluyendo iones de magnesio (Mg), estroncio y manganeso (Mn) presentes en la solución del suelo.

Es así que dentro del contexto arqueológico el hueso humano pasa por un proceso de deterioro que culmina con el equilibrio en relación con su ambiente inmediato. En algunos casos estas alteraciones concluyen con una total destrucción; en otros, los cambios producen una nueva estabilidad, un equilibrio con el medio que lo rodea (Manzanilla y Arellín 1999).

Para el antropólogo es esencial que el estudio de los enterramientos comience en el campo; en gran medida, el cuidado con que se excavan las osamentas y se registran los datos condiciona las potencialidades y la validez de los estudios posteriores (Duday 1997). Se necesita diferenciar los elementos químicos de origen tafonómico provocados por las condiciones en que ocurrió la descomposición del cuerpo y por la intervención fortuita de agentes naturales

(erosión, infiltración de agua, alteraciones físico-químicas y acción de microorganismos).

La antropología puede recurrir a estudios de la química de los huesos para conocer dietas prehispánicas considerando información derivada de las ciencias naturales. Durante el enterramiento, varios procesos químicos y biológicos, que actúan destructivamente sobre el mineral y las proteínas del hueso, provocan un estado de preservación mínimo en el cual se encuentran la mayoría de los huesos arqueológicos. El hueso es altamente poroso, así que cualquier cambio en el tamaño del poro puede influenciar la extensión de la alteración diagenética.

### 3. Objetivos e hipótesis

Objetivo general:

Conocer la diagénesis del hueso considerando el contexto de enterramiento para entender los mecanismos físicos y químicos en la interacción del suelo con el tejido óseo, y así evaluar la influencia de estos fenómenos en los estudios de dietas antiguas.

Objetivos particulares:

- Evaluar las características físicas y químicas del hueso.
- Evaluar las condiciones físicas y químicas del suelo.
- Evaluar el efecto de la diagénesis en los estudios de paleodieta.

Hipótesis

La alteración del hueso no deja de generar controversias, sobre todo por las variables que están relacionadas tanto en la biología del hueso como en las características del suelo, hasta la fecha muchos autores han notado que hay una fuerte influencia de las características físicas y químicas de los suelos en la

composición del hueso al momento del descubrimiento. Uno de los autores que ha contribuido en estos estudios en el contexto de la antropología física latinoamericana es Roberto Rodríguez (2005).

Desde los años setenta, para entender la dinámica de enterramiento para los diferentes contextos prehispánicos y prehistóricos, se hizo notorio que la acidez del suelo era uno de los factores principales respecto a la alteración de los huesos enterrados como lo reporta Gilbert (1975, 1977; citado en Buikstra *et al.* 1989), quien argumenta que hay elementos del suelo que reaccionan fácilmente con la química del hueso dependiendo de las condiciones de acidez.

De igual manera, Lambert y colaboradores (1983, 1984, 1985, 1990, 1991), en sus estudios de elementos químicos en huesos antiguos: Ca, hierro (Fe), aluminio (Al), Mn, sodio (Na), Cu, etc., mostraron que los elementos en el suelo pueden moverse al interior de la matriz del hueso, lo que demuestra la contaminación del hueso con tales elementos.

En este sentido, es evidente que los efectos de la diagénesis deben ser investigados cuidadosamente en cualquier análisis de la química del hueso, porque las osamentas humanas de origen arqueológico contienen compuestos minerales que son susceptibles de reaccionar químicamente con los elementos o compuestos presentes en el contexto de enterramiento; desde este punto de vista mi hipótesis es que los restos óseos estudiados aquí mostraron cambios en su composición química y en la estructura cristalina interna y externa de los mismos, como consecuencia de las características químicas y físicas del lugar de enterramiento en Los Olmos, Hidalgo. Por este motivo, las evaluaciones de dieta a partir de huesos humanos de origen arqueológico estarán alteradas de no tomarse las medidas para contrarrestar la diagénesis.

La relación suelo-hueso se da en función de dos variables particulares: por un lado, las características físicas y químicas del suelo, en donde también hay influencia de fenómenos climáticos y geológicos; y por el otro, por las características de las propias osamentas, su antigüedad y profundidad de enterramiento, la región anatómica, el tipo de tejido (compacto, esponjoso) y la edad del sujeto al momento de la muerte.

## Capítulo II. Antecedentes

---

### 1. Estudios de diagénesis y paleodieta

Los análisis de elementos químicos en hueso se iniciaron en antropología a mitad de los años setenta. Al principio, esos estudios fueron aceptados con gran optimismo, porque se trataba de un procedimiento que daba una medida cuantitativa directa de las características de las dietas antiguas, específicamente respecto a la proporción de tejido animal/vegetal consumida. Sin embargo, pronto se demostró que las concentraciones de elementos estaban influenciadas por cambios complejos interrelacionados; sobre todo, por el influjo de la diagénesis, esto es los procesos *post mortem*. En 1973, Brown se enfocó en la investigación del Sr, dirigida a conocer diagénesis y dieta. A partir de ahí, y con el mismo objetivo, se han realizado análisis de una variedad de elementos en el hueso arqueológico humano y no humano (Schoeninger 1979, Sandford 1993). Los estudios de la química del hueso se centraron principalmente en la cuantificación de estroncio basándose en la premisa de que los intestinos de los mamíferos preferencialmente absorben más Ca que Sr de la comida ingerida. Con el paso del tiempo se utilizaron otros elementos químicos y en la actualidad, con el surgimiento de otras técnicas, se han hecho análisis profundos en la química del hueso y en la química del suelo, considerando varios elementos presentes, con la finalidad de entender los procesos diagenéticos que tienen lugar durante el enterramiento.

En la misma década Gilbert (1975, 1977) y Bahou (1975, citado en Buikstra *et al.* 1989), ya exploraban el patrón de cinco elementos (Zn, Sr, Mn, Mg y Cu) en tibias de tres esqueletos excavados en el sitio “Dickson Mounds”. Buscaron asociaciones entre las frecuencias de los elementos determinadas por espectroscopia de absorción atómica. El primer autor identificó diagénesis al examinar las frecuencias de los elementos para nueve muestras de suelo obtenidas del interior de la cavidad medular de dichos huesos largos. Aunque encontró cantidades insuficientes de Zn, Sr, Cu o Mg en el suelo, la técnica le



indicó diferencias de la química del suelo en contacto directo con los huesos en comparación con la química presente en los estratos más alejados de los mismos. Se esperaría que el suelo en contacto con el hueso estuviera más en equilibrio con el tejido óseo adyacente. Otro indicador de las variantes en la concentración de los elementos del suelo fue su acidez, encontrando valores entre 4 y 6. La acidez del suelo puede afectar fuertemente la disolución de algunos minerales del hueso. Gilbert argumenta que el Mn es altamente variable debido a la diagénesis, y que por lo tanto no es útil en estudios de paleodieta. Este autor también reportó que la presencia de Mn, Zn y Mg disminuyen a través del tiempo, sin tendencias observables para Sr y Cu.

Por otro lado, Szpunar (1977, citado en Price 1989) utilizó muestras de fémures y costillas de 23 esqueletos. Midió los niveles de Ca, Na, Sr, Mg, Cu, Zn, potasio (K), Fe, Mn, Al y plomo (Pb). Encontró niveles similares en ambos tipos de hueso sólo para Zn y Pb, los niveles de Ca, Na y Sr fueron más altos en los fémures que en las costillas y los niveles de Mg, Cu, K, Fe, Mn y Al más altos en las costillas. Los valores elevados de los elementos principales en los fémures los explicó por la gran cantidad de hueso cortical denso presente en ellos en comparación con las costillas, que contienen en su mayoría hueso esponjoso. Se argumenta que algunas de las diferencias pueden también reflejar distinciones reales en la composición elemental del hueso al momento de la muerte, pero como un resultado indirecto de la dieta. Estos patrones diversos en costilla y fémur debidos a las diferencias del tejido esponjoso son claros en la actualidad; es decir, las diferencias en la contaminación del hueso dependen de la porosidad de su estructura, porque los elementos o compuestos presentes en la solución del suelo tardan más tiempo en precipitarse y penetrar en los huesos en los que predomina el tejido compacto, como sucede con las diáfisis de los huesos largos.

Para los años ochenta hay un aumento en los análisis dirigidos al entendimiento de la diagénesis y la dieta. Los estudios químicos de las zonas de enterramiento relacionados con los compuestos del hueso son más detallados. El pH es una de las características químicas del suelo que ya estaba aportando datos de controversia en el estudio de las condiciones del hueso enterrado.

Gordon y Buikstra (1981) documentaron una correlación altamente positiva entre el pH del suelo y la preservación del hueso, ya que observaron un deterioro marcado en los huesos de adultos en contextos similares con pH de 6 y 7. White y Hannus (1983) se refieren a que la estructura del hueso es relativamente insoluble con el pH cercano a 7.5, con una solubilidad que se incrementa rápidamente bajo el pH de 6. Estos autores, al examinar en detalle las relaciones entre erosión del hueso y las condiciones del suelo, plantean que la diagénesis de la hidroxiapatita del hueso se inicia como consecuencia de los ácidos resultantes de la acción microbiana sobre la fase orgánica del tejido óseo (colágeno) y por el reemplazo de calcio en la hidroxiapatita. Sugieren que cuando se consume el colágeno del hueso, los continuos cambios diagenéticos en los niveles de Ca son dependientes de las condiciones del suelo. Si los suelos son ácidos y los hidrógenos están disponibles, la erosión de los cristales del hueso puede continuar. Si el Ca está presente en suelos más básicos, la erosión puede cesar cuando los niveles de calcio en el hueso se han estabilizado, aunque dependiendo en parte de las condiciones de temperatura y humedad (Rottländer 1976).

En este periodo ya se usaban patrones de difracción de rayos X para examinar la posibilidad de diagénesis en huesos humanos. Schoeninger usó esta técnica en muestras de hueso del pleistoceno superior en el Cercano Oriente, específicamente para detectar el enriquecimiento del mineral del hueso por medio de la precipitación de apatita geológica o de carbonato presente en las aguas subterráneas. El total de Sr en el mineral del hueso y la proporción Sr/Ca estuvieron alteradas. “El enriquecimiento por medio de la apatita geológica provocó un incremento en los niveles de calcio y un decremento en la cantidad relativa de estroncio en el mineral del hueso” (Schoeninger 1982: 46: citado en Price 1989).

White y Hannus (1983) enfatizaron la importancia de los contextos de enterramiento para cualquier consideración de la diagénesis, remarcando que la determinación del pH del suelo, en el depósito, proporciona información útil sobre el contexto de la diagénesis. Aseguraban que la estructura porosa del tejido óseo es susceptible a la infiltración de materiales ajenos, lo cual podía notarse a través

del análisis de secciones delgadas del hueso al microscopio. También advirtieron que el Ca podía introducirse por medio de la precipitación de carbonato de calcio presente en el agua del suelo, mientras que el cuarzo se introducía en forma de granos sólidos. Argumentaban que el porcentaje del Ca en el hueso pulverizado podía proporcionar alguna medida clara de los cambios diagenéticos (Price 1989).

Lambert *et al.* (1983, 1984, 1985, 1990, 1991) realizaron estudios de elementos en restos humanos. Su investigación se centró en determinaciones dietarias, biológicas y metodológicas, con un énfasis dirigido a la diagénesis. Evaluaron varios elementos (Sr, Zn, Mg, Ca, Na, Cu, Fe, Al, Mn, K, cadmio (Cd) y Pb) utilizando costillas y fémures de varios sitios de enterramiento. Las técnicas multivariadas les proporcionaron no sólo una demostración de los efectos de la diagénesis, sino también un medio para cuantificarlos con controles apropiados para la edad, el sexo y las diferencias de contaminación. Los elementos asociados con la contaminación (Mn, K, Al, Fe) produjeron patrones similares en función de la edad de muerte, con niveles inusualmente altos para los más jóvenes. Sus resultados indicaron que la diagénesis ocurre más rápidamente en las costillas de los infantes y de los individuos más viejos. Como ya se ha comentado, la porosidad más alta de estos huesos contribuye a esta observación. Los elementos no contaminantes (Sr, Zn, Na, y Ca) mostraron una pequeña disminución con la edad. “Estos cambios pueden reflejar tendencias fisiológicas naturales. Es conocido, por ejemplo, que el calcio disminuye con la edad” (Lambert *et al.* 1985: 479).

Plantearon que los elementos del suelo podían moverse al interior de la matriz del hueso a través de diferentes mecanismos, incluyendo el intercambio con los constituyentes naturales del hueso (intercambio heteroiónico), depósito en espacios no rellenados o con defectos y adsorción. En este sentido, Parker y Toots (1970, 1980, citado en Lambert *et al.* 1985) discutieron estos factores en el estudio de la diagénesis: “el ión de fluoruro reemplaza al hidróxido, y el estroncio reemplaza al calcio en la matriz de hidroxiapatita. Aunque Mn, Fe y silicio (Si) normalmente ocupan espacios sin un intercambio heteroiónico” (Lambert *et al.* 1985: 479).

Debido a que Fe, Al, K y Mn, pero no Sr o Zn, son observados por su papel en la contaminación de la superficie del hueso, concluyen que en la fase temprana de diagénesis el principal mecanismo es el relleno de los espacios, aunque consideran que deberían analizarse otras condiciones de enterramiento. El flujo de elementos inorgánicos entre el hueso y el suelo podría dar cuenta de los niveles de elementos en el suelo inmediatamente alrededor del hueso enterrado, a menos que los elementos fueran particularmente solubles y hayan sido desplazados significativamente alrededor por la acción del agua subterránea. Plantearon que los niveles de elementos que se movían del suelo al hueso tendrían que ser más bajos en el suelo muy cercano al hueso. Dichos autores efectuaron una serie de análisis de suelos para probar esta hipótesis. En ese estudio las muestras de suelo fueron tomadas a 5 cm arriba, abajo y al lado de los esqueletos. Las concentraciones de Sr y Zn fueron las mismas en todas las direcciones y no variaron con la distancia desde el hueso. Este patrón fue característico del no flujo entre hueso y suelo (Lambert *et al.* 1984).

Los elementos Ca, Fe, Al, K y Cu no estuvieron distribuidos homogéneamente alrededor del hueso y las concentraciones variaron con la distancia desde el hueso. El Ca mostró concentraciones más altas que las normales inmediatamente próximas al hueso, con una disminución a medida que se alejaba del mismo. El proceso no movió al Ca de igual forma en todas las direcciones, y los gradientes desaparecieron con la distancia. En contraste, Fe, Al, y K mostraron concentraciones más bajas que las normales cerca del hueso, con un incremento en relación con la distancia, patrón característico de la contaminación del suelo al hueso. También encontraron que la distribución de Na fue homogénea en todas las direcciones desde el hueso; no obstante, otra evidencia les sugirió que este elemento se filtraba desde el hueso al suelo.

Debido a que el Na normalmente exhibió la solubilidad más alta, para los autores se debió probablemente a que este elemento se haya filtrado u homogeneizado por el efecto de las aguas subterráneas. Sus estudios de suelo también mostraron una distribución homogénea del Pb alrededor del hueso. El Pb parecía no estar sometido al flujo con el suelo. Por lo tanto, el caso de este

elemento no quedó claro, lo cual indicaba la importancia de hacer pruebas de los efectos diagenéticos en cada estudio de la composición inorgánica del hueso (Lambert *et al.* 1985).

Después de examinar todas estas aproximaciones, concluyeron que el Sr y el Zn son los elementos más resistentes a los efectos de la diagénesis; por lo tanto, los más seguros en el estudio de las dietas antiguas. El Ca y el Na podían sufrir pérdidas a través de la filtración, pero también deberían ser útiles en el contexto dietario. Para huesos más antiguos, los cuales hubieran sido estudiados menos cuidadosamente, y para aquellos en etapas avanzadas de descomposición, estos cuatro elementos no serían confiables. El Mg y el Pb dieron resultados confusos en varias pruebas diagenéticas. Para los autores, Fe, Mn, Al, K, Cu, bario (Ba), vanadio (V) y uranio (U) habían probado consistentemente ser muy contaminantes durante el enterramiento. Sin embargo, los dos últimos elementos no habían sido analizados a profundidad. “Bajo cualquier circunstancia, los efectos de la diagénesis son tan fuertes que ningún estudio de dietas antiguas, basado en la composición inorgánica, debe ser llevado a cabo sin los controles diagenéticos apropiados” (Lambert *et al.* 1985: 481).

Los estudios de Lambert y colaboradores son detallados, por lo que su aportación al tema es de indudable relevancia. Hicieron comparaciones del suelo y la composición del hueso en el contexto de enterramiento. La ausencia de diferencias en los niveles de Sr entre costillas y fémures, y entre suelo y hueso, les sugirió que el este elemento químico estaba generalmente estable en el ambiente depositacional. No obstante, notaron que otros elementos en el hueso eran significativamente enriquecidos o perdidos por diagénesis. Por sus estudios, en el transcurso de varios años, observaron por medio de análisis de microscopía electrónica concentraciones de Fe, Al, K, Mn y Mg a lo largo de las capas más externas del hueso, sugiriendo que esos elementos se adicionaban por contaminación después del enterramiento.

En 1984, Katzenberg (citado en Buikstra *et al.* 1989), interesado en el Sr y la dieta, también analizó los elementos como un medio de controlar la diagénesis. Utilizó 98 costillas de cinco sitios, considerando Sr y tres metales pesados,

circonio (Zr), itrio (Y) y rubidio (Rb). Las determinaciones de Ca, P, Si, Al, Fe, Mn, titanio (Ti), Mg y K fueron reportadas para una submuestra de 25 costillas. Los valores medios para Ca y P fueron comparados con observaciones en materiales modernos con una proporción esperada de calcio/fósforo (Ca:P) de 2.16. Los análisis de muestras de suelo mostraron una pequeña variación sugiriendo que las diferencias ambientales en los valores de Sr no impactaron el estudio. Planteó que el Sr no se correlacionaba con los tres metales pesados, contaminantes esperados. Y reemplazaba al calcio en el cristal de la hidroxiapatita mientras que el Zr y Rb se infiltraban en los poros del tejido. A partir del supuesto de que los contaminantes Sr/Zr tienen la misma proporción en el hueso y en el suelo, generaron un factor de corrección que aplicaron a la serie. Algunas muestras fueron afectadas, pero el patrón previamente observado no fue modificado significativamente. De los otros elementos, Si, Fe y Mn aparecieron enriquecidos. En cuanto al Si y el Ti, se asumió que no fueron significantes biológicamente. Por su parte, Pate y Brown (1985) indican que el Sr está generalmente estable en los suelos y, por el contrario, el Ca es móvil, incorporándose en la hidroxiapatita. El Sr se halla solamente en la estructura microcristalina de la apatita y no se establece en los espacios intercristalinos.

El caso del Sr, ampliamente considerado en los estudios de dietas antiguas, es un tema que genera polémica, sobre todo porque sabemos que se encuentra en todos los suelos aunque en diferentes proporciones, pero es un elemento que indudablemente reacciona con los elementos del hueso y se precipita no sólo en su superficie, sino también en su estructura interna. Para el Sr, Price (1989) obtuvo un coeficiente de variación de 35% en 53 muestras modernas de Wisconsin. En poblaciones humanas contemporáneas se han reportado coeficientes de variación en el rango de 19.1% entre individuos de todas las edades en Japón y 29.3% o más en Gran Bretaña. “El coeficiente de variación en un grupo de humanos modernos, dentro de un límite geográfico, es probable entre 20 y 25%” (Price 1989: 128). Esta variación está relacionada con la edad, el sexo, el metabolismo y el rango reproductivo. Las poblaciones humanas prehistóricas exhiben variabilidad en el Sr del hueso comparado con grupos humanos

modernos. Los entierros de sitios arqueológicos por todo el medio oeste de los Estados Unidos muestran coeficientes entre 10 y 40% (Price 1989). Es probable que la diferencia en el Sr del hueso entre los sitios se deba a una combinación de los niveles de Sr del medioambiente local, variación en la dieta regional y la diagénesis. Algunas diferencias menores adicionales son introducidas por el sexo, la edad y el rango reproductivo.

Por otro lado, Kyle (1986) comparó las concentraciones de elementos en costillas y dientes de 37 enterramientos en Papua, Nueva Guinea, usando fluorescencia de rayos X y espectrometría de difracción de rayos X. Sus resultados mostraron que los huesos, pero no los dientes más duros, estuvieron físicamente contaminados con cuarzo, calcita y arcilla y químicamente contaminados con niveles más altos de Al, Fe, Sr, azufre (S), Ba y Zn, y cantidades similares de Na, K, Mg y Cu. Price (1989) describe muchas situaciones donde la diagénesis física y química puede ser demostrada en varios contextos de enterramiento, incluyendo las cuevas en Sudáfrica, sedimentos de grava en el sur de Suecia y entierros de multiniveles en Wisconsin. Es indudable que la contaminación física y química del hueso es promovida por la afinidad de algunos elementos del hueso con otros del suelo, debido a que en el ambiente del enterramiento generalmente hay elementos o compuestos que reaccionan rápidamente con el material de su entorno, en este caso el hueso humano.

Para el sitio de Papua, Nueva Guinea, también se tomaron muestras del suelo del lugar de enterramiento a una profundidad de 1 m, y fue analizado por difracción de rayos X. En el suelo predominaban calcitas cuarzo y silicio, con pequeñas cantidades de algunos minerales de arcilla no identificados. Hubo contaminación considerable del hueso con Si y Ca. Los huesos humanos normales contenían muy poco Si y la proporción de la masa Ca/P de 2.81 es mucho más grande que la de 2.14 encontrada en huesos frescos de mamíferos o la de 2.16 de mineral de hueso puro (hidroxiapatita). El autor notó que la fuerte correlación negativa de Si con Ca y P se esperaría si el hueso estuviera contaminado con cuarzo, como lo indicaron los resultados de difracción de rayos X. La fuerte correlación positiva de Si con K, Al, Fe, Mg y Sr (aunque estos

elementos estuvieron presentes en concentraciones muy bajas) sugirió una contaminación por material de tamaño arcilloso que contiene estos elementos asociados con cuarzo (Kyle 1986).

El autor propone que para calcular la cantidad de Ca presente como contaminante más que como mineral del hueso, hay que presuponer que el P en el hueso estuvo como hidroxapatita. El Ca fue calculado a partir de la cantidad de P presente utilizando el valor teórico de la proporción Ca/P en el mineral de hueso fresco (2.16). Este valor fue sustraído desde la concentración total de Ca en el hueso para obtener la cantidad de Ca presente como contaminante. Argumenta, por lo tanto, que este procedimiento nos dará una baja estimación del valor verdadero del Ca presente como hidroxapatita y, de esta manera, tendremos una sobreestimación del Ca como contaminante, ya que algún fosfato normalmente es reemplazado por carbonato en el mineral del hueso.

A partir de sus resultados, aplicando difracción de rayos X, y considerando análisis previos de huesos con altas proporciones de Ca/P, se dedujo que el Ca contaminante debería estar presente como carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Durante el proceso de fusión, la calcita podría perder dióxido de carbono para formar óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ). La presencia de óxido de calcio en el hueso calentado a  $950^\circ\text{C}$  fue verificada a través de la difracción de rayos X. Todos los otros elementos, excepto el Ca, estuvieron fuertemente correlacionados con el Si. Es evidente que la difracción de rayos X puede ser usada para obtener un tamaño estimado del cristal. Los resultados por este medio hacen notar la alteración química de los huesos e indican que el tamaño de los cristales se puede incrementar durante el enterramiento (Kyle 1986).

En los años ochenta ya se discutía que algunos elementos o compuestos del suelo penetran con más facilidad en los huesos más porosos. Hanson y Buikstra (1987) obtuvieron microradiografías de las zonas delgadas de fémures, concretamente en la sección media, con el propósito de examinar los patrones de variabilidad en la alteración histomorfológica en una muestra de restos esqueléticos del valle bajo de Illinois. Fueron seleccionados 119 esqueletos correspondientes a individuos adultos de entre 18 y 49 años de edad, de acuerdo



con un protocolo de muestreo diseñado para un estudio histomorfométrico del remodelamiento del hueso cortical de adultos. La sección transversal fue removida de la zona media de los fémures derechos de cada esqueleto. Se obtuvo una parte de 100 micras usando una sierra giratoria de alta velocidad de hoja diamantada. La uniformidad del grosor se evaluó usando un micrómetro de disco y las ligeras desviaciones fueron corregidas en un moedor manual entre dos láminas de vidrio. Finalmente fue preparada una microradiografía de cada sección y examinada bajo luz microscópica. También observaron que las costillas, dado su tamaño y relativa porosidad, son mucho más susceptibles a cambios diagenéticos. “En los huesos porosos hay un rápido intercambio iónico” (Hanson y Buikstra 1987: 552). Por este motivo, es recomendable saber en qué huesos del esqueleto es más factible realizar estudios de dieta.

La microradiografía les reveló un deterioro histológico completo con evidencia de redeposición mineral, posiblemente en la forma del carbonato de calcio. Para los autores esto puede ser la etapa final de la descomposición histológica, en la cual sólo los límites de las osteonas y canales haversianos quedan intactos. En este punto, las reacciones químicas entre el hueso y la matriz del suelo han alcanzado un equilibrio. “Junto a la identificación de microorganismos involucrados en el proceso destructivo, los elementos del suelo y la influencia de las aguas subterráneas deben también ser tomados en cuenta” (Hanson y Buikstra 1987: 560). Sus resultados muestran que hay una ligera preservación histológica diferencial de costillas. Aparentemente, los diferentes huesos pasan por una alteración histomorfológica en diversos niveles en función del tamaño del hueso y de la relativa permeabilidad (porosidad) del tejido a la microflora y microfauna.

Como ya se comentó en líneas anteriores, varios investigadores recomiendan el uso de hueso cortical denso, en contraste con el tejido trabecular más poroso, para reducir los efectos de la contaminación física. Klepinger *et al.* (1986), midieron las concentraciones de elementos químicos en hueso cortical humano de esqueletos procedentes del sitio Morgantina, en Sicilia. Se analizaron diez elementos químicos en muestras de 32 huesos de adultos y no encontraron

patrones claros a través del tiempo en la composición del hueso, como podría esperarse con una dieta cambiante. Seis elementos (Ba, Fe, Cu, K, Na y Sr) no cambiaron progresivamente, Cd y Mn decrecieron y Mg y Ca se incrementaron con el paso del tiempo. Los valores del Ca, que en el hueso constituyen 37 o 38% del contenido pulverizado, fueron extremadamente altos. Concluyen que la diagénesis es impredecible al hacer comparaciones entre individuos. También plantean que el hueso cortical es muy heterogéneo en su composición.

Para finales de los años ochenta, Pate y Hutton (1988) planteaban que los estudios de diagénesis, que comparaban directamente suelo y química del hueso no habían considerado los elementos disponibles en el suelo que podrían estar involucrados en cambios *post mortem*, sino que sólo estaban procurando estudiar la composición total del suelo. Estos autores compararon iones intercambiables y solubles con el contenido elemental total en un perfil de suelo en el sitio Roonka, al sur de Australia. Sus resultados indicaron que sólo un pequeño porcentaje de cada elemento estaba disponible en la solución del suelo. El Ca y el bicarbonato fueron los iones solubles más comunes.

Otro detalle de sus estudios fue la obtención de muestras de suelo a intervalos de 10 cm. Registraron datos del clima, como la lluvia, y reconocieron el color de las muestras con tablas Munsell. La composición total de elementos fue determinada para Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Si, Sr y Ti. Utilizaron espectrometría de fluorescencia de rayos X con un espectrógrafo Phillips PW1400. Mezclaron las muestras de suelo (400 a 500 g) con agua destilada hasta alcanzar el punto de saturación. Las pastas de suelo fueron cubiertas y puestas en reposo durante 18 horas. El agua de la superficie fue recolectada, se agregó suelo adicional y las pastas fueron cubiertas por 18 horas más. Este procedimiento fue repetido hasta que el agua restante fue absorbida totalmente por el suelo. El pH del suelo fue determinado colorimétricamente sobre las pastas usando un paquete indicador Merck. Cada pasta fue dispuesta en un papel filtro número 50 y las soluciones fueron extraídas desde un vacío y colectadas en jeringas. Las soluciones fueron analizadas para Al, boro (B), Ba, Ca, cobalto (Co), Cu, Fe, K, Mg, Mn, molibdeno (Mo), Na, P, S, Sr y Zn a través de espectrometría de emisión

atómica inducida en parejas de plasma, usando un espectrómetro vacío. Los valores de pH del suelo estuvieron entre 8 y 8.5, el contenido de agua de las pastas de suelo saturadas oscilaron de 3.7 a 5.5% sobre bases secadas en horno. “Los metales de tierras alcalinas, calcio, estroncio y magnesio, son los cationes más solubles bajo estas condiciones del suelo” (Pate y Hutton 1988: 734).

Aclaran que el Ca fue el catión intercambiable dominante a lo largo de las arenas de la capa estudiada en dicho sitio. La materia orgánica escasa y los altos contenidos de cuarzo provocaron valores de cationes intercambiables y una capacidad de intercambio catiónico extremadamente baja. Notaron que el pequeño porcentaje de cada elemento, para la solución y la solubilidad variable de diferentes elementos, ilustra las complicaciones potenciales asociadas con el uso de información de elementos totales para las inferencias relacionadas con la diagénesis *post mortem* en el mineral del hueso. Consideran que los iones intercambiables y solubles serán más útiles en el desarrollo de modelos geoquímicos para rastrear la composición de minerales secundarios y las fases de sustitución iónica en el hueso arqueológico, ya que el Ca y el bicarbonato son iones solubles dominantes en los suelos de ese sitio. Plantean que el carbonato de calcio se precipita a lo largo de las fracturas y en los espacios creados por la descomposición de la materia orgánica. A menudo hay contaminación por Mg, Sr, Mn y otros iones desde la solución del suelo (Pate y Hutton 1988).

Las proporciones de elementos esperadas en las fases de sustitución diagenética en el hueso pueden calcularse desde las concentraciones relativas de iones en la solución del suelo, desde la afinidad de estos iones para la superficie del hueso y las posiciones interiores del cristal. De esta forma, “las porciones de hueso alteradas por los intercambios después de la muerte con la solución del suelo, debería ser distinguible de aquellas señales químicas retenidas en vivo” (Pate y Hutton 1988: 736). Estos autores afirman que las calcitas a menudo contienen otros elementos, incluyendo Sr, Mg y Mn desde los iones en el suelo. También señalan que muchas soluciones, incluyendo citrato de triamonio, ácido nítrico y ácido acético se han usado para remover tales carbonatos secundarios desde el hueso fósil.

Buikstra *et al.* (1989) hicieron una aproximación multivariada de elementos, también en contextos arqueológicos. Las muestras de estudio fueron de la región centro-oeste de Illinois. Se hicieron registros y amplios estudios geomorfológicos y geológicos para caracterizar los suelos que forman el ambiente de depósito de los restos óseos humanos. También obtuvieron el pH del suelo, que varió entre 8 y 4.5 en un sector de crestas escarpadas.

Seleccionaron un conjunto de 14 elementos principales y secundarios (Zn, Sr, Cd, Pb, Al, Fe, Mn, Ba, Cu, V, Mg, K, Na y Ca) para incluir estudios que presentaban variaciones de acuerdo con la dieta, interacciones metabólicas y las afinidades de los componentes del hueso. También, escogieron a través de análisis univariados previos, los elementos que se probaron para saber si eran objeto de los efectos diagenéticos. Además, se anticipó que la edad y el sexo de los restos podrían influenciar los niveles de ciertos elementos. Plantearon que los elementos de la diagénesis podían ser identificados a través de las correlaciones con otros elementos del suelo, así como por medio de asociaciones con sitios específicos.

Determinaron que los rasgos de interés a partir de los resultados en la matriz de correlación son: 1) la relativa independencia de Ca, Pb y  $\delta^{13}\text{C}$ ; 2) la intercorrelación de K, Al, Fe y Mn; y 3) la intercorrelación de un elemento con un pequeño grupo de otros como en el caso de Na con Mg y V, de Sr con Mg, Ba y Ca, y de Zn con Cd y Cu (Buikstra *et al.* 1989).

Los elementos encontrados en cantidades más bajas en el suelo que en los huesos fueron tentativamente juzgados como contaminantes improbables: Sr, Zn, Ca, Na y posiblemente Mg. Los niveles relativamente altos de Fe, Al y K en el suelo son comparables con las cantidades de Cu y Mn que hacen que estos elementos posiblemente se hayan infiltrado al hueso. Concluyeron que Sr, Zn, Ca y Na, y probablemente Cu y Mg, no fueron afectados por la diagénesis, con valores de Fe, Al, Mn y K sospechosos. Las comparaciones de suelo entre dos sitios de Illinois indicaron diferencias no significativas para Sr, Zn, Ca, Fe, Al y Mn. No encontraron diferencias significativas por sexo para ningún elemento. Notaron que pudo haber sido producto de dietas equivalentes o de la contaminación. En

otro sitio, Zn, Sr y Ca eran diferentes de acuerdo con los sexos. Los valores más altos para Sr y más bajos para Zn, encontrados en esqueletos de mujeres, les sugirió que los hombres pudieron tener un acceso desproporcionado a proteínas animales o quizás a frutos secos o legumbres. Argumentaron que, con excepción de Al, todos los elementos tienden a disminuir desde la infancia hasta la vejez. Esta es una tendencia especialmente pronunciada en Cu. Como se espera, Ca decrece a lo largo de la adultez. Aunque ciertos elementos (Fe, Al, Mn y K) son contaminantes, aumentaron en frecuencia a lo largo de las distintas edades de la adultez para uno de los sitios más antiguos.

También se compararon los resultados de los fémures con los de las costillas para un mayor entendimiento de los elementos diagenéticos, utilizando promedios obtenidos para 47 fémures de ambos sitios. El hecho de que Sr, Zn y Mg mostraran valores idénticos, les indicó que estos elementos no fueron afectados por la diagénesis. Las concentraciones para tres elementos (Ca, Na y Pb) fueron más bajas en las costillas, sugiriéndoles los efectos de la filtración; y Fe, Al, Mn y K fueron más altos, como consecuencia de un efecto de enriquecimiento (Lambert *et al.* 1983).

En los años setenta y ochenta hubo una preocupación por los efectos diagenéticos en algunos de los estudios sobre dietas. Aunque los elementos químicos contenidos en los huesos enterrados comenzaban a estar bajo la observación minuciosa como una fuente de información acerca de las dietas del pasado, la introducción de contaminantes inorgánicos durante el entierro podía debilitar algunas conclusiones basadas en los análisis de elementos. Por lo tanto, muchos grupos comenzaron a proponer métodos para minimizar los problemas de diagénesis. Se han desarrollado procesos de limpieza para remover la contaminación del hueso antes de proceder con los análisis químicos.

Para los años noventa, el grupo de Lambert *et al.* (1990) describió un procedimiento físico en que la superficie del hueso es removida entre uno y tres milímetros, con la finalidad de quitar o disminuir los elementos que fueron absorbidos en la superficie del hueso durante el enterramiento, los cuales ocupan los espacios dejados por la materia orgánica, o están en la estructura de la apatita

del hueso cercana a la superficie. Aunque los autores señalan que este procedimiento podría no ser capaz de atenuar la uniformidad o la penetración de esta contaminación.

Las concentraciones de Sr, el elemento más ampliamente estudiado para análisis paleodietarios, parecen no estar afectadas en algunos contextos de enterramiento (Pate y Brown 1985, Price 1989, White y Hannus 1983). En esencia, los cambios diagenéticos en el Sr del hueso y otros elementos son probables en virtud de los contextos de enterramiento y si se consideran para la reconstrucción de las dietas pasadas debe ser siempre con las reservas necesarias.

A pesar de que numerosos estudios han tratado de dirigirse al problema de la diagénesis, en ocasiones los resultados son ambiguos debido a que el grado de alteración después del enterramiento, y los elementos que son afectados, difieren en los distintos contextos. Los efectos de la diagénesis deben ser investigados cuidadosamente en cualquier análisis de la química del hueso, considerando el ambiente de los sitios de enterramiento, en donde se valore la lluvia, la geomorfología, la edafología y la vegetación, porque de esta forma se pueden entender las primeras etapas de destrucción y contaminación del hueso.

En estas circunstancias, considerando las primeras etapas de alteración del tejido óseo, Hedges *et al.* (1995) estudiaron huesos humanos en cuanto a su porosidad excavados en tres sitios arqueológicos. Encontraron aumento de poros de acuerdo con la inmersión de los restos en agua. Esto tiene implicaciones importantes para el proceso diagenético, porque la pérdida de microporosidad implica aún más la pérdida en el área de la superficie y, por consiguiente, a la magnitud de la interacción con el ambiente. No se conoce exactamente la causa de la pérdida de los microporos, pero dos posibles causas pueden contribuir, según ellos: la disolución de los cristales más pequeños cambia la distribución del tamaño del poro y la microporosidad puede disminuir durante la destrucción histológica; pero aclaran, que esta destrucción no es una explicación suficiente. Lo que sí es claro, es que las medidas de micro y macroporosidad dan una indicación directa del grado de cambio diagenético. Los autores justifican que hacen falta

experimentos extensos para probar dichos mecanismos y así afirmar si la pérdida de los cristales de hidroxiapatita está relacionada con la microporosidad.

Greenlee (1996) utilizó ocho muestras de huesos humanos excavados en los valles centrales de Ohio y del río Mississippi para explorar la variabilidad estructural y composicional en los huesos arqueológicos. Utilizó la técnica de microscopía electrónica. Empleó secciones transversales de 1 cm de espesor de la región media de los huesos largos. Obtuvo información de la composición de los elementos Ca, P, Sr, Ba, Cu, V, Mn, Fe y Zn.

Notó que las áreas generalmente dañadas aparecen redondeadas con formas irregulares de “burbuja”, a menudo con bordes más afilados hipermineralizados. “Generalmente estas clases de alteraciones son características de la disolución mineral asociada con las actividades de microorganismos, seguidas por la remineralización con incorporación de iones desde el mineral disuelto del hueso y la solución del suelo” (Greenlee 1996: 243). Las áreas diagenéticamente alteradas distribuidas en las superficies expuestas del hueso tuvieron un porcentaje de peso medio de Ca y P más grande, y una varianza también más grande; mientras que, al mismo tiempo, las proporciones Ca/P no difirieron entre las dos. “La geología y la acidez del ambiente del depósito son factores particularmente influyentes en la determinación de la solubilidad de los minerales del suelo y su subsiguiente interacción con el hueso” (Greenlee 1996: 347). Concluye que el Sr y el Ba, los cuales son conocidos por sustituir al Ca en los fosfatos de calcio, tienden a aparecer en concentraciones medias más altas y con una variabilidad mayor en las áreas alteradas que en las inalteradas. Las concentraciones en las áreas alteradas son más altas que las que podrían ser relativas para la densidad incrementada del Ca y el P. Por otro lado, Mn, Fe y Zn son más variables dentro y entre los huesos.

Baraybar y De La Rúa (1997) hicieron la reconstrucción de la dieta con elementos químicos de esqueletos provenientes del sitio Pico Ramos, en España. Analizaron Zn, Fe, Mg, V, Cu, Sr, Ba, Ca y P en 35 diáfisis femorales de dichos esqueletos de individuos adultos. Las muestras fueron puestas en una solución de acetato con pH 4.5 para eliminar las partículas de carbonato adheridas. Los

sedimentos (0.5 g) fueron saturados con 10 ml de agua destilada y agitados por 12 horas en un tubo. Después, la solución fue centrifugada, trasegada y filtrada.

Los análisis de la solución del suelo indicaron algunos iones solubles como  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{PO}_4^{-3}$ . Encontraron que el Ca fue el catión más abundante en la solución del suelo. “Es posible que entró al hueso como carbonato de calcio, lo que se comprobó por medio del análisis de difracción de rayos X, esto implica una masiva contaminación de este compuesto durante el tiempo de la post-inhumación” (Baraybar y De La Rúa (1997: 361). Así como sucede con el carbonato de calcio, que se precipita en el tejido óseo, hay otros minerales del suelo que se adhieren a la estructura de la hidroxiapatita, haciendo al hueso más denso.

Galloway *et al.* (1997) realizaron un estudio en huesos humanos motivado por la necesidad de obtener un estándar de la densidad mineral del hueso. Los huesos: húmero, radio, ulna, fémur, tibia y fíbula, fueron medidos por un absorciómetro de fotones que consistía en localizaciones compatibles a lo largo de la diáfisis, metáfisis y epífisis. Se obtuvieron densidades minerales del hueso moderno de población caucásica. En general, encontraron lecturas de densidades superiores a lo largo de la diáfisis, los lugares diafisiarios más distantes, en dirección a las epífisis, mostraron más disminución en su densidad. Las densidades minerales del hueso tienden a variar dependiendo de su morfología. Por ejemplo, en las epífisis se han encontrado las densidades más bajas a causa de que en dichas porciones del hueso predomina el tejido esponjoso. En su investigación tomaron en cuenta el valor que tiene la edad respecto a la parte estructural del hueso. Observaron que durante la vida adulta “joven” el hueso normalmente incrementa o estabiliza su masa, posteriormente ésta disminuye a lo largo de los años.

Los resultados indicaron que la región media de la diáfisis tenía una densidad superior; en parte, debido a las diferencias en las técnicas de medida, principalmente en las localidades de los sitios examinados. Los autores mencionan que hay múltiples factores que intervienen en la degradación del hueso, tanto factores intrínsecos y extrínsecos, la propia porosidad y densidad del hueso, así como los factores ambientales. Sugirieron líneas de referencia de



series de densidad para comenzar a valorar la verdadera influencia de los factores ambientales. Los valores de densidad fueron relevantes para predecir cuáles partes del esqueleto podían contaminarse con más facilidad en los contextos arqueológicos (Galloway *et al.* 1997).

Las mediciones de porosidad hechas en hueso arqueológico han revelado relaciones muy cercanas entre alteraciones minerales. Los resultados tienen implicaciones relevantes para los modelos que intentan cuantificar las proporciones y la extensión de la reacción química entre el hueso y su ambiente geoquímico. Las mediciones de porosidad tienen el potencial para llegar a ser una herramienta útil en la caracterización del cambio diagenético.

En esta dirección, Hedges y Millard (1995) desarrollaron una teoría para describir aquellos cambios diagenéticos en el hueso en relación con las aguas subterráneas. Desarrollan el siguiente argumento: primero, describieron muchos cambios diagenéticos importantes para el hueso donde las aguas subterráneas juegan una parte esencial y, segundo, esbozaron cómo los conceptos desarrollados a partir de los estudios de la humedad del suelo podían ser aplicados al hueso enterrado. En este plano, Hedges *et al.* (1995) reportaron un estudio de la diagénesis del hueso realizado en tres sitios arqueológicos diferentes. En su estudio, la distribución de la porosidad fue medida utilizando la técnica de absorción de agua adaptada desde la ciencia del suelo. Notaron una pérdida de microporosidad en los huesos arqueológicos que estudiaron correlacionada con un incremento en la macroporosidad y propusieron que estos cambios probablemente fueron producto de los mecanismos de disolución, acompañados por la recristalización del mineral. Estudios posteriores han confirmado esta relación.

Los términos macroporosidad y microporosidad han sido definidos siguiendo el trabajo de Hedges, Millard y Pike en 1993 (Hedges *et al.* 1995). Estos rangos no están de acuerdo con las definiciones dadas por la Unión Internacional de Químicos Puros y Aplicados (IUPAC 1972); citado en Nielsen-Marsh y Hedges (1999); pero han determinado exitosamente cómo estos rangos de poros se

relacionan con las alteraciones diagenéticas, tales como pérdida de proteína e incremento en la cristalinidad (Nielsen-Marsh y Hedges 1999).

Durante el enterramiento, varios procesos químicos y biológicos que actúan destructivamente sobre el mineral y las proteínas del hueso provocan un estado de preservación mínima en la cual se encuentran la mayoría de los huesos arqueológicos. El hueso tiene un área de superficie interna muy grande y es altamente poroso, así que cualquier cambio en la distribución del tamaño del poro del hueso podría bien influenciar la extensión de la alteración diagenética que pueda ocurrir (Hedges *et al.* 1995). Por ejemplo, “los huesos arqueológicos a menudo han aumentado la macroporosidad en relación con el hueso fresco, haciendo al hueso arqueológico mucho más susceptible a la acción del agua, y acelerando la disolución mineral y la degradación colagénica” (Nielsen-Marsh y Hedges 1999: 166). La porosidad puede jugar un rol central en el grado de la alteración diagenética. Las mediciones de la porosidad pueden registrar cambios en la estructura del hueso a niveles microscópicos y macroscópicos y de componentes minerales y orgánicos (Hedges y Millard 1995).

Por otra parte, Nielsen-Marsh y Hedges (2000a) midieron parámetros diagenéticos de huesos arqueológicos enterrados en sitios del noroeste de Europa. Esos parámetros fueron deterioro estructural, cambios en micro y macroporosidad, contenido proteínico, una medida de cristalinidad y una medida del contenido de carbonato. Concluyen que la hidrología tiene una fuerte influencia en la preservación y porosidad como parámetro diagenético que determina los reflejos de la degradación del hueso en el ambiente del entierro.

Los cambios en la porosidad necesariamente indican cambios en la estructura física. La cristalinidad aumenta durante la diagénesis del hueso. Además, las medidas de porosidad obtenidas de huesos arqueológicos en otros estudios indican que la redistribución del tamaño del poro ocurre durante la diagénesis que no es explicable sólo por disolución. En el hueso arqueológico, como se ha reportado en otros estudios anteriormente, el carbonato usualmente se deposita como carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en la superficie, en las grietas y en los espacios porosos del hueso (Nielsen-Marsh y Hedges 2000a).

En un segundo artículo, Nielsen-Marsh y Hedges (2000b) investigaron el efecto en la estructura y alteración química causada por la diagénesis. Fue un experimento designado para medir los cambios en los parámetros diagenéticos en hueso fresco y arqueológico desproteínizado en laboratorio, después del tratamiento con ácido acético. El ácido acético es comúnmente usado como un “agente limpiador” para remover el carbonato diagenético del hueso. También consideraron la porosidad, la cristalinidad, la preservación histológica, el contenido de carbonato y el contenido de calcita. Utilizaron huesos arqueológicos del sur de Inglaterra con variada preservación. En una de sus conclusiones notaron que el incremento en la macroporosidad y decremento en la microporosidad son características del cambio diagenético durante el enterramiento (Nielsen-Marsh y Hedges 2000b).

En otro sentido, también hay estudios de dieta para poblaciones mexicanas pretéritas que comentan y analizan aspectos diagenéticos. Brito (2000) realizó el análisis social de la población prehispánica de Monte Albán a través del estudio de la dieta. Para ello efectuó un estudio multifactorial, centrándose en la variabilidad de la composición química de los restos óseos y su evaluación comparativa con información de índole cultural, social, económica y política. La muestra esquelética provino de individuos asentados durante la fase terminal del periodo Preclásico (100 a.C. - 250 d.C.). Empleó análisis químicos en los restos óseos para indagar el tipo y la proporción de los recursos consumidos y establecer patrones de alimentación en forma individual y colectiva. El proceso consistió en identificar en los huesos la presencia de una serie previamente seleccionada de 22 elementos minerales y cuantificar sus niveles, recurriendo a las técnicas de espectrometría de masas y difracción de rayos X, para diagnosticar la intervención del material óseo por elementos del contexto de enterramiento. Se utilizaron huesos largos, un total de 41, correspondientes a entierros directos. Los elementos químicos seleccionados para el estudio fueron Ca, P, Si, Al, Mg, Na, K, Mn, cloro (Cl), Zr, Sr, Ba, níquel (Ni), Zn, Fe, S, cromo (Cr), Cd, Rb, neodimio (Nd) y talio (Tl).

La autora plantea que el estroncio sigue considerándose un indicador fundamental para los estudios de dieta, por ser un mineral que resiste los

intercambios iónicos con el ambiente externo. Remarca que las cantidades minerales que se detectan en los restos óseos son similares, o por lo menos no han tenido grandes alteraciones, a las que el individuo poseía en vida. Sin embargo, deja claro que el proceso de limpieza mecánica de la superficie del hueso promovió ciertas dudas respecto a la eliminación óptima de contaminantes. Otra carencia mencionada fue la ausencia de muestras de suelo procedentes del contexto de enterramiento, necesarias para verificar la información teórica sobre la composición química de los suelos del lugar donde se excavaron los esqueletos; lo que hubiera contribuido a entender mejor los mecanismos diagenéticos y las alteraciones minerales en los huesos.

Otro estudio relevante en población prehispánica fue realizado por Ochoa (2002), quien hizo la reconstrucción de la dieta de los pobladores de La Ventilla, Teotihuacan, Estado de México, por medio de la cuantificación de elementos. Para detectar diagénesis, recomendó que se podían emplear métodos como difracción de rayos X para la identificación de fases cristalinas y tamaño de cristales; fluorescencia de rayos X para la cuantificación de los elementos presentes en el suelo, y microscopía electrónica de barrido para conocer los elementos propios del hueso y aquéllos que fueron incorporados en su estructura por su relación con el suelo del entorno.

Para conocer el estado de deterioro del hueso, previo al análisis de elementos, realizó un rastreo diagenético con dos marcadores básicos: el potencial de hidrógeno (pH) y la concentración de carbonatos. Para el primer caso se obtuvo un promedio del suelo del contexto arqueológico de 8.32. Esto llevó a considerar que las características del suelo se encontraban dentro de los rangos aceptables para la conservación de la materia orgánica. Por otra parte, “el comportamiento de los carbonatos fue de moderado a alto, entre 3 y 4 lo que hizo suponer que existía una incorporación alta de Ca de carácter contaminante” (Ochoa 2002: 103).

Su estudio osteoquímico como tal permitió determinar la concentración de Fe, K, Ca, Sr, Zn y Ba. Los dos primeros como marcadores diagenéticos y los cuatro últimos como marcadores de dieta. La fase de selección de los marcadores

de dieta se efectuó en una matriz de correlación simple entre los siguientes elementos: Fe, K, Zn, Sr y Ba, para observar su comportamiento en grupo; así, se encontró que el Fe y el Zn se aglutinaron; de esta forma, el Zn se desplazó hacia los elementos contaminantes y se descartó su rol como marcador de paleodieta. Por su parte, el K y el Ca se mantuvieron en un plano independiente. Con lo que respecta al Sr y al Ba, se ubicaron en un plano de asociación en relación con el resto de los elementos, manifestando así su carácter de marcadores confiables de paleodieta (Ochoa 2002). El Fe no se correlacionó con elementos contaminantes como el K. Destaca la correlación positiva entre el Ca y el K, lo que para la autora representa una asociación diagenética entre ambos, tomando en cuenta que el K procede del suelo. Las altas concentraciones de Ca contaminante se hicieron también evidentes con la determinación semicuantitativa de carbonatos en suelo.

Otro estudio trascendente en el que se da importancia a la diagénesis del hueso fue el realizado por Rodríguez (2004); su objetivo general se centró en la reconstrucción de la dieta de la población colonial de Xcaret, Quintana Roo, México y la comparación de estos resultados con los obtenidos en la población prehispánica, asimismo para conocer el estado nutricional diferencial de ambas ocupaciones, partiendo del estudio de la correlación de los parámetros osteoquímicos con los osteomorfológicos derivados del estudio antropológico. También comparó los resultados del análisis osteoquímico de Xcaret con los de dos sitios del occidente de Cuba tomando en cuenta la disponibilidad de los ecosistemas que caracterizan a ambas áreas. En su trabajo, aunque remarca que el análisis químico de huesos humanos es una fuente directa de información acerca de la dieta principal de una población, también sugiere que es de esperar que en la interacción del hueso con el suelo puede haber alteraciones diferenciales en los contenidos de elementos traza durante la diagénesis, lo que en ocasiones no se tiene en cuenta en los estudios de paleodieta.

Es evidente que mucha de la información biológica presente en el hueso está oscurecida como resultado de la diagénesis. Sin duda, la duración del enterramiento y el ambiente del entierro son variables críticas en la alteración diagenética. Los cambios en el mineral del hueso aparentemente son acelerados

durante y después de la descomposición de una parte del componente orgánico del hueso. En un medio ambiente húmedo, la acción de microorganismos disuelve el mineral de apatita y puede remover la señal biogénica original.

Hasta el momento, se ha notado que un número importante de procesos geoquímicos contribuyen a la alteración diagenética del hueso. Esos procesos son influenciados por factores intrínsecos y extrínsecos. Variables intrínsecas incluyen la densidad, porosidad, tamaño y composición química del hueso. En general, es evidente que los huesos más porosos son más susceptibles a la diagénesis. Los factores extrínsecos incluyen la geoquímica del suelo, el pH (Gordon y Buikstra 1981), características mineralógicas, composición orgánica, textura del suelo y el clima, principalmente la lluvia. Estas variables climáticas contribuyen a la velocidad de los procesos diagenéticos.

Los análisis químicos en hueso arqueológico ofrecen mucho más que información dietaria. La diagénesis debe ser considerada como una fuente potencial de variabilidad en cualquier investigación sobre elementos del hueso y paleodieta. Cada contexto de enterramiento debe ser examinado individualmente para evaluar la extensión de la actividad diagenética y el grado en el cual el hueso ha sido químicamente alterado.

En la actualidad hay una variedad de técnicas para la investigación de las concentraciones de elementos químicos en los restos esqueléticos arqueológicos. Inicialmente la atención se centró en desarrollar un criterio para seleccionar los elementos con potencial para proveer información de la base de subsistencia de poblaciones arqueológicas. Con el tiempo, se han incorporado otros elementos para obtener información dietaria y diagenética. Estudios recientes, conducidos por antropólogos y químicos, sugieren que el comportamiento de los elementos en el hueso ocurre por periodos intermitentes (Beck 1985).

Dentro de las diferentes técnicas para reconocer la diagénesis, la primera y más importante se refiere a los estudios de la química del suelo de los contextos de enterramiento y de los lugares cercanos donde no hay esqueletos enterrados, determinando la solubilidad y los iones intercambiables en el suelo. La segunda, el análisis del hueso humano con técnicas como la microscopía electrónica (Lambert

*et al.* 1983, 1984) y difracción de rayos X (Kyle 1986). Tercera, por medio de estudios osteológicos comparativos entre huesos humanos arqueológicos y valores obtenidos de poblaciones modernas, o entre huesos del mismo esqueleto para evaluar porosidad y densidad (Buikstra *et al.* 1989). En contraste, un número de investigadores han desarrollado otras técnicas que incluyen el desarrollo de factores de corrección y perfiles de solubilidad del hueso (Sillen *et al.* 1989); esos métodos son normalmente desarrollados en el contexto del sitio específico (Sandford 1993). A partir de varios estudios se ha demostrado que la mayor contaminación del hueso es por el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) del suelo y del agua subterránea que preferentemente se deposita en los huecos y en la superficie del cristal (Ambrose 1993).

Mientras que la mayoría de los estudios se refieren al uso del estroncio para caracterizar dietas humanas antiguas, muchos investigadores miraron más allá de él intentando usar un ordenamiento más amplio de los elementos para refinar las estimaciones de las diferencias dietarias. Algunos estudios han producido resultados ambiguos, principalmente debido a las influencias no dietarias en las distribuciones de los elementos.

Conforme avanzó la investigación de elementos químicos del hueso, también comenzaron las interrogantes relacionadas con la diagénesis del mismo. Hasta la fecha, los efectos de la diagénesis del hueso son más conocidos. En ocasiones, los estudios en este sentido son contradictorios, pero la mayoría de los autores argumentan que sí ocurren cambios significativos durante el enterramiento en los niveles de algunos elementos del hueso.

## Capítulo III. Marco conceptual

---

### 1. Algunos aspectos relacionados con la dieta humana

Es recomendable que los estudios diagenéticos, referidos a interpretaciones dietarias, consideren una serie de fenómenos relacionados con la alimentación debido a que ésta tiene influencia en la química y física de los huesos durante la vida del individuo. En el presente apartado, se describen, de manera general, las variaciones de la dieta en distintos momentos de la historia cultural de Mesoamérica; también se revisan las funciones biológicas de algunos minerales básicos en el organismo, las necesidades de ciertos elementos químicos en la dieta humana; así como también se discute si algunas de las enfermedades, expresadas en los huesos del esqueleto, interfieren en las interpretaciones diagenéticas.

#### A. Fisiología y dieta

En la época prehispánica, así como en otros periodos de desarrollo, las poblaciones humanas tuvieron una intensa interacción con su entorno inmediato a fin de obtener recursos alimenticios. Al ingerir diversos alimentos, incorporaron múltiples sustancias del medio, sujetándose a las variaciones físicas y químicas de éste. Es decir, muchos de los constituyentes orgánicos e inorgánicos del ambiente estuvieron en constante relación con los seres humanos por medio de la alimentación. Los nutrientes inorgánicos constantemente se alojan en el tejido óseo. Sin embargo, aunado al aprovechamiento del entorno, para adquirir y preparar los alimentos, también se debe considerar que “la satisfacción de los requerimientos nutricionales en todos los pueblos depende no solamente de los productos disponibles, sino de sus hábitos dietéticos peculiares, como son la forma de preparación de los alimentos para su consumo, la frecuencia y cantidad de su ingestión, etc” (López y Serrano 1974: 139).



De los hábitos dietéticos depende mucho la nutrición de las personas. La nutrición es el proceso mediante el cual los seres vivos obtienen, digieren y asimilan los alimentos. Los humanos necesitan el alimento para poder llevar a cabo sus funciones vitales. El alimento es una sustancia compleja que está formada por compuestos orgánicos e inorgánicos, entre otros iones. La mayoría de los compuestos presentes en el alimento son nutrientes. Un nutriente es una sustancia que provee al cuerpo energía o materia prima que es necesaria para las reacciones químicas. La materia prima se usa en el crecimiento y en la reparación de los tejidos. Por su parte,

los minerales son materiales inorgánicos que se pueden absorber sin digerir; generalmente están en su forma iónica, son elementos muy necesarios para el buen funcionamiento del cuerpo, formando parte en algunas reacciones químicas dentro de éste. En la dieta se necesitan solamente pequeñas cantidades de minerales (Alexander *et al.* 1992: 501, 502).

Ingestión, utilización y excreción son las funciones efectuadas por numerosos organismos con relación a los diversos elementos. La cantidad de nutrientes minerales aprovechables aumenta por la liberación de elementos minerales producto de organismos y tejidos muertos descompuestos por la acción de microorganismos y por rocas desintegradas por intemperización o por procesos biológicos. Por ejemplo, los ácidos orgánicos, liberados en el suelo durante el proceso metabólico de las raíces, disuelven algunos de estos minerales contenidos en las partículas del suelo, haciéndolos más aprovechables para los sistemas vivientes, pero provocando reacciones desfavorables para la condición química de los huesos enterrados.

La mayoría de los estudios diagenéticos se basan en la fracción inorgánica del hueso, porque la mayoría del contenido mineral del cuerpo está en el esqueleto. Los minerales forman cerca de 4% del peso total del cuerpo y, como se mencionó, tienen funciones específicas para el mantenimiento adecuado del cuerpo humano (Cuadro 1). El Ca y el P forman la mayor parte de la estructura del hueso (Biggs *et al.* 2000).

*Cuadro 1*  
 Funciones de los principales minerales mayores relacionados con estudios de  
 diagénesis y dietas antiguas

Mineral	Función	Fuente
Calcio	Formación de huesos y dientes, coagulación de la sangre, actividad normal de los músculos y nervios	Productos lácteos, huevos, nueces, granos enteros, pescado, legumbres
Fósforo	Formación de huesos y dientes, regulación del pH de la sangre, contracción muscular y actividad nerviosa, componente de enzimas, ADN, ARN, ATP	Leche, cereales de grano entero, carne, vegetales
Sodio	Regulación del pH de los líquidos corporales, transmisión de los impulsos nerviosos	Productos del mar, sal de mesa, la mayoría de los alimentos, vegetales
Potasio	Transmisión de los impulsos nerviosos, contracción muscular	Vegetales, plátano, cereales
Magnesio	Función muscular y nerviosa, formación de los huesos, función enzimática	Papas, frutas, cereales de grano entero, vegetales verdes, carne, leche

(Biggs *et al.* 2000: 665, Alexander *et al.* 1992: 503)

Los nutrientes inorgánicos, o sales minerales, se dividen en dos amplios grupos: los macronutrientes (K, Na, Cl, P, Ca, Mg y S), que se necesitan en cantidades relativamente grandes, y los micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn, Co, yodo (I), selenio (Se), V, B y Mo), que se requieren en muy pequeñas cantidades. Cerca de 4% del peso seco del protoplasma está constituido por los primeros elementos; mientras que menos de 1% lo forman los micronutrientes. El hecho de que estos últimos se necesiten sólo en cantidades muy pequeñas, no quiere decir que sean menos importantes que los macronutrientes, inclusive los elementos de ambos grupos sirven para evaluar diagénesis y dietas antiguas (Nason 1987).

El K y el Na intervienen principalmente en el mantenimiento de relaciones osmóticas apropiadas en los fluidos tisulares y celulares; y además, en el

establecimiento de un estado físico apropiado del protoplasma, especialmente de las membranas celulares. Estos iones son esencialmente los activadores de un número específico de sistemas enzimáticos en el metabolismo de los carbohidratos. En las plantas verdes, el sodio está relacionado con los primeros pasos de la fotosíntesis. El K influye en la contracción muscular y es un activador fundamental de la enzima *enolasa*, que cataliza uno de los pasos necesarios en la respiración anaerobia. “En los animales, el sodio se presenta en la mayoría de los fluidos del cuerpo extracelulares en combinación con proteínas, Cl y bicarbonato, mientras el potasio se encuentra la mayor parte de las veces dentro de las células” (Nason 1987: 214).

El Ca es trascendente en los estudios diagenéticos porque tiene relación con el Sr (que se utiliza como marcador dietético) dada su afinidad química en la estructura cristalina del hueso. En los animales superiores el Ca es un componente estructural (junto con el P) del esqueleto, y necesario en el mecanismo de la coagulación de la sangre. El Mg también está asociado con el P como un ingrediente en la estructura ósea. Virtualmente, todo el Ca (99%), y la mayoría del Mg (70%) del cuerpo, se encuentran en los huesos. En la sangre, el Ca se presenta en su mayor parte en el plasma, mientras que el Mg forma parte principalmente de los glóbulos rojos (Nason 1987).

Los iones de Mg funcionan como activadores de numerosos sistemas enzimáticos en animales, plantas y microorganismos, particularmente de enzimas que median la transferencia de los grupos fosfatos. Los iones de Ca activan pocas enzimas, los iones de Mg y de Ca también ejercen una influencia muy significativa sobre el estado físico del protoplasma (así como K y Na), especialmente sobre la permeabilidad de las membranas. En el reino vegetal el Mg ocupa una posición única como un componente metálico específico altamente especializado de las clorofilas. El nivel extraordinariamente elevado de Mg en el tejido muscular está asociado con su función en la activación de enzimas específicas y en el mantenimiento del estado físico del protoplasma (Nason 1987).

El P, elemento en forma de fosfatos, desempeña un papel clave en el metabolismo energético (como parte del sistema ATP), en el metabolismo

intermediario de carbohidratos, por medio del proceso anaerobio y del proceso oxidante de la *pentosa*, así como componente de los ácidos nucleicos, fosfoproteínas y fosfolípidos.

El fósforo es también un constituyente estructural muy importante en el hueso y está influido por muchos de los factores que afectan el metabolismo del calcio. Estos incluyen a las vitaminas D y la hormona paratiroidea que controlan el depósito y movilización del calcio y fosfato en el tejido óseo, así como su excreción del cuerpo (Nason 1987: 215).

## B. Dieta en la época prehistórica

La especie humana, por medio del conocimiento de su entorno inmediato, producto de la adaptación, ha obtenido los minerales necesarios para cubrir las necesidades básicas de su organismo. Por lo que sabemos de la dieta de pueblos cazadores recolectores, la caza no constituyó su principal alimento, porque los vegetales proporcionaron alrededor de 70% de su dieta. Estos grupos vivían de carne, pescado, fruta, verduras y no consumían cereales con mucha frecuencia. Más adelante, debido al sedentarismo, cambió la forma de vida y hábitos alimenticios. El aumento de animales domésticos incrementó el comercio. Hubo cambios dietéticos, en donde los cereales eran la base de la agricultura en algunas poblaciones del Neolítico. El procesamiento del grano, con molinos de mano de piedra, provocaba que pequeñas cantidades de polvo de roca se mezclasen con la harina aumentando así el desgaste dentario y la ingesta de ciertos minerales provenientes de las rocas. En este periodo predominaron los vegetales complementados con carne y pescado. Los productos vegetales eran los cereales cultivados específicamente: trigo, arroz y maíz (Campillo s/a).

Los hábitos de alimentación y el ambiente circundante, para la obtención de sus recursos, acarrió, en los distintos contextos diferentes efectos en la salud de los individuos. Por ejemplo, con el sedentarismo hubo disminución de traumatismos graves, pero aumentaron otro tipo de daños apreciables en el esqueleto por lo difícil de los trabajos agrícolas. La relación con animales

domésticos acarreó enfermedades infecciosas y aparición de epidemias, el cólera, el paludismo y la tuberculosis, entre otras; y con el aumento del comercio aumentó la difusión y transmisión de las enfermedades infecciosas y parasitarias procedentes de territorios muy alejados.

Gracias a los códices y otros manuscritos, a los restos arqueológicos y al estudio etnográfico de los grupos indígenas y campesinos, quienes conservan claramente diversas costumbres, en la actualidad se sabe acerca de la alimentación de los pueblos prehispánicos. Para “el Altiplano central, la costa del Golfo y el sureste de México, la dieta prehispánica es mejor conocida por la referencia de numerosos cronistas e historiadores que nos dan a conocer la características y los recursos alimenticios de esos pueblos” (López y Serrano 1974: 139).

Los conocimientos de los antiguos mexicanos en botánica, en medicina, en arquitectura, en agricultura, en astronomía y en religión nos permiten notar que tenían las bases necesarias para acceder a una dieta equilibrada por medio del aprovechamiento de innumerables recursos. En la región geográfica que aquí nos ocupa, el estado de Hidalgo, como una región semiárida con un paisaje de planicies extensas, abundan cactáceas, magueyes, yucas, mezquites y matorrales bajos. En esa zona se realizó el cultivo de maíz. En los cerros cercanos había quelites. Para la preparación de los alimentos se utilizaban las flores de yuca, los botones de la flor del nopal y la biznaga, la flor del colorín y las semillas del mezquite. Se cocinaban verduras y algunos tipos de carne en un horno subterráneo. Del maguey obtenían el aguamiel que servía para elaborar azúcares y vinagre. El aguamiel fue un endulzante frecuente en la época prehispánica. En esta región, las cactáceas, en particular nopales y xoconostles, formaban parte de la cocina, agregando los alimentos de consumo general que abundaron en el México prehispánico (López y Serrano 1974, Crosby 2003).

Para la época prehispánica, la alimentación consistió básicamente de maíz preparado de diversas maneras, además de la gran variedad de vegetales. “Existen elementos arqueológicos que nos hablan de la persistencia de un patrón básico de alimentación, fundamentado en el consumo de maíz” (López y Serrano

1974: 140). Otros productos básicos fueron el frijol, chile, jitomate, tomate y calabaza; y para la preparación de los diversos alimentos utilizaron comales, ollas y vasos de barro, cuchillos de obsidiana, molcajetes y metates. El frijol fue de los vegetales de gran consumo; así como las numerosas variedades de chile y calabaza eran igualmente fundamentales en la dieta prehispánica. “También había chayotes, papas, camotes, mezquites, nopales, así como una serie de yerbas que se comían cocidas o crudas, como los múltiples quelites, quintoniles, la malva, el huauzontle y diversas especies de hongos” (López y Serrano 1974: 142). El amaranto, un producto básico del México prehispánico, actualmente es una fuente de proteína vegetal (Crosby 2003).

Había frutas en abundancia y en gran diversidad: la piña, el mamey, la chirimoya, la guanábana, el zapote, la tuna, la guayaba, el tejocote, el capulín, el nanche, el cacahuete y la jícama. Algunas bebidas se obtenían por medio de la fermentación del maíz y la chíca, aunque la principal era el pulque, que se elaboraba de la savia del maguey y era preparado par su consumo de muy diversas maneras. Abundaban el guajolote y el perro. También había animales provenientes de la caza y la pesca; topos, zorrillos, tlacuaches; otros animales pequeños de campo y de monte y un gran número de especies de aves como codornices, patos y grullas. Algunos reptiles eran comestibles como la iguana, ciertas culebras y las lagartijas; hormigas, langostas, chapulines, gusanos de maguey, escamoles y jumiles, entre otros. De las especies acuáticas, el camarón, cangrejos, tortugas y ranas, acociles. También consumían huevos de diferentes aves y tortugas, mieles de abejas, de hormigas y de abejones. “Son pocos los productos minerales consumidos directamente, ya que sólo se menciona la sal y la cal, esta última empleada en la elaboración de las tortillas” (López y Serrano 1974: 143).

A pesar de las diferencias regionales, en la comida prehispánica mexicana existió un sustrato alimenticio común en todo Mesoamérica. Fue una dieta esencialmente vegetariana, con pocas fuentes de proteína de carne animal. El hombre antiguo, en las diferentes regiones, logró satisfacer sus necesidades de proteína por medio de la mezcla de maíz y frijol. Los aminoácidos ausentes en los

cereales, se encontraban en las leguminosas. Mediante el aprovechamiento de los recursos naturales lograron establecer una dieta variada, suficiente y posiblemente balanceada dependiendo de sus costumbres alimentarias. La creatividad, característica en los pobladores mexicanos, dio paso al aprovechamiento de diversos productos. El maíz, como se ha mencionado, es uno de los alimentos más versátiles que, hasta hoy, se utiliza de diversas maneras. La comida del indígena en el México prehispánico era muy heterogénea, puesto que aprovechaba en una forma extraordinaria todos los recursos vegetales y animales a su disposición (López y Serrano 1974).

Por otra parte, es sabido que a partir de la conquista hubo una paulatina aculturación, se empezaron a dar una serie de cambios en Mesoamérica y la comida tradicional indígena se modificó gradualmente con la llegada de los españoles, quienes introdujeron plantas y animales, lo que condujo a un cambio en la forma y calidad de vida. Los pobladores de Tetetzontilco, Hidalgo, no fueron la excepción a dicha aculturación.

Después de la conquista, muchos productos introducidos en los países colonizados tuvieron más influencia en la dieta del Nuevo Mundo. Para México, sobre todo el trigo, la vid, la carne de res, cabra, borrego, cerdo y sus derivados, el azúcar de caña, los cítricos, ciertas hortalizas como la cebolla y el ajo, y algunos condimentos como el perejil, el cilantro, el orégano y el clavo de olor; es decir, vegetales destinados a cultivos intensivos y para el comercio entre los propios colonizadores.

El trigo llegó a América en 1493, y no tuvo un éxito inmediato. En la zona que rodea al Estado de México, Puebla y Oaxaca, y en regiones dispersas en la Nueva España, se cultivaba trigo en gran cantidad. Buena parte se destinaba a satisfacer la demanda de los españoles, pero presentaba el atractivo adicional de ser productivo en los lugares demasiado secos para que prosperara el maíz. En 1492, el maíz era el grano en las áreas de mayor densidad de población del Nuevo Mundo, y con frecuencia siguió siéndolo durante mucho tiempo, al menos como alimento para el consumo local, más que como cosecha comercial. Otro ejemplo lo constituye el ganado vacuno, que fue introducido a las praderas

continentales, de tal manera que para 1580 algunos ranchos del norte de México tenían rebaños de 150 mil reses (Crosby 2003).

Hacia mediados del siglo XVI, precisamente el fechamiento que tienen los enterramientos excavados en la actual comunidad de Los Olmos, en Hidalgo, América había experimentado cambios culturales, políticos, religiosos, tecnológicos y biológicos, un momento crucial en relación con la alimentación antes y después de la conquista. Para finales del mismo, los principales efectos sobre la alimentación fueron la adopción de nuevos instrumentos y técnicas de cultivo por los indígenas, la introducción de la ganadería, cambios en el modo de preparar y consumir la comida, el inicio de la industrialización de algunos alimentos y la apertura de establecimientos públicos para la venta de alimentos (Vargas y Casillas 2003).

Como consecuencia de la conquista, los pueblos mesoamericanos tuvieron acceso a otros animales comestibles entre los que se destaca el cerdo, las ovejas y el ganado vacuno, de donde obtuvieron proteínas animales. Las proteínas vegetales provinieron del maíz, el amaranto y los frijoles. A mitad del XVI el problema más común entre los indígenas fue el consumo de alcohol, había gran producción y comercio de pulque. El pulque, el mezcal y el aguardiente de caña fueron las bebidas embriagantes de mayor consumo entre los novohispanos. A la llegada de los españoles, el consumo de maíz se mantuvo como la base alimenticia del pueblo mexicano, particularmente de los dominados, quienes constituían la mayoría de la población (García 2003, Domingo 2003).

### C. Dieta y patología

Sin duda que la alimentación humana, a lo largo del tiempo, ha tenido cambios como consecuencia de los diversos ambientes habitados, así como por las influencias por parte de otros pueblos; y sobre todo, por las costumbres alimenticias. Si la base de los estudios de dietas antiguas se refiere a que la ingesta de alimentos queda registrada en la estructura de los huesos, a lo largo de la vida de los individuos; es recomendable que la cuantificación de elementos en



el hueso, tanto para evaluar dietas como para diagnosticar diagenesis, integren además estudios osteológicos de las alteraciones físicas de los huesos causadas por algunas enfermedades relacionadas con la fisiología del organismo responsable de la asimilación de ciertos minerales.

En este sentido, uno de los puntos de controversia en los estudios diagenéticos, es saber si algunas enfermedades que se manifiestan en el tejido óseo interfieren en los análisis de elementos químicos del hueso. Sabemos que la región metafisiaria, de un hueso en crecimiento, es un lugar de gran actividad anabólica. La multiplicación y el crecimiento de las células del cartílago, como el aumento de las células osteógenas, y su diferenciación en osteoblastos, requiere gran intensidad de síntesis proteica. Con toda esta actividad anabólica, es indudable que cualquier deficiencia nutritiva o metabólica, que afecte la síntesis de proteína, o de carbohidratos, puede reflejarse rápidamente en alguna alteración del crecimiento en la región metafisiaria. En esta zona, también se depositan con gran rapidez sales de calcio en la sustancia intercelular orgánica. El crecimiento normal del hueso en esa zona está en función de que la calcificación y la síntesis proteica sean normales. Estos dos procesos, síntesis de materiales orgánicos y calcificación de sustancia intercelular, están sincronizados, y cuando la síntesis llega a ocurrir sin calcificación adecuada, pronto se observa un cuadro histológico alterado en la metafisis (Ham 1970).

La interferencia de la síntesis de materiales orgánicos en la metafisis de un hueso en crecimiento se observó en la enfermedad denominada escorbuto. Desde hace tres siglos se sabía que esta enfermedad no se desarrollaba en niños y adultos cuyas dietas contenían frutas y vegetales frescos. Más adelante, se comprobó que el escorbuto era una enfermedad causada por falta de un factor esencial de la alimentación, la vitamina C, que existe en las frutas y verduras frescas. En la actualidad, se sabe que algunas enfermedades pueden también producirse por falta de vitaminas. La hemorragia subperióstica es el riesgo más importante del escorbuto. Al curar las hemorragias, éstas son reconocidas por la calcificación de los hematomas. En los niños, los hematomas se suelen asociar con fracturas metafisiarias que no se observan en los adultos (Campillo s/a).

Aunque la deficiencia de vitamina C afecta el metabolismo de diversos tipos celulares, resulta sobre todo visible en la metáfisis de un hueso en crecimiento, donde esta vitamina impide la multiplicación adecuada tanto de los condroblastos como de las células osteógenas y en particular les impide sintetizar y elaborar sustancia intercelular orgánica. La interrupción casi completa de la formación de hueso hace que la diáfisis del hueso se vuelva muy delgada; en consecuencia, fácilmente se fracturan tanto la placa epifisaria como la diáfisis. La sustancia intercelular que se forma se calcifica intensamente (Campillo s/a). Por lo tanto, el escorbuto representa un trastorno donde se halla el defecto en las actividades anabólicas relacionadas con la multiplicación de células y sus síntesis de sustancias intercelulares orgánicas, sin afectar la fracción inorgánica, la base de la mayoría de los estudios diagenéticos.

Otro ejemplo es el raquitismo. Un valor disminuido de Ca o de P en la sangre no impide obligadamente la calcificación, porque ésta depende de que, cerca del hueso o del cartílago, los iones de Ca y de fosfato estén en concentraciones que se acerquen a su producto de solubilidad, y así permitan que intervenga un mecanismo que origine precipitación local de sales cálcicas en la sustancia intercelular orgánica. En un niño pequeño, el esqueleto normalmente absorbe grandes cantidades de fosfato cálcico. Su dieta debe contener cantidades adecuadas de Ca y de P. Además, para que estos minerales se absorban y alcancen el torrente vascular, también es necesario un aporte adecuado de vitamina D.

Si la dieta de un niño es deficiente en estos factores esenciales, el resultado es la aparición del trastorno denominado raquitismo. Lo primero que se observa es que, si bien el crecimiento continúa y las sustancias intercelulares orgánicas siguen sintetizándose, la calcificación del cartílago cesa casi totalmente en los discos epifisarios. Si la sustancia intercelular situada alrededor de las células de esta zona no se impregna de minerales, las células ya no quedan separadas de sus fuentes nutricias. En consecuencia, continúan vivas. El resultado es que persiste el desarrollo en la zona de crecimiento de los discos, y éstos se vuelven más gruesos de lo normal. Cuando la calcificación no se interrumpe por completo,

sino que se produce en unos cuantos puntos en la superficie diafisaria del disco, su espesor tiende a ser irregular. Durante este tiempo, los osteoblastos continúan depositando sustancia intercelular en la metáfisis, pero dicha sustancia no se calcifica por lo bajo del producto Ca/P. Por el contrario, queda descalcificada mientras no mejora la dieta. El hueso neoformado, durante el tiempo que sigue sin calcificar, recibe el nombre tejido osteoide. Esta enfermedad es poco probable porque la vida al aire libre favorece la síntesis de la vitamina D, a menos que se den inviernos prolongados o largas estancias en el interior de las casas (Campillo s/a).

Los defectos nutritivos y metabólicos se observan en las metáfisis de huesos en crecimiento más rápidamente que en huesos de adultos. Sin embargo, hay un recambio tanto del hueso esponjoso como del compacto durante toda la vida. Secciones de sistemas haversianos viejos mueren, se desarrollan túneles de resorción y se forman nuevos sistemas en los túneles. Cuando los individuos envejecen, el ritmo de resorción aumenta y, en consecuencia, el hueso compacto del esqueleto se hace más poroso de lo que es a mitad de la vida; de aquí la importancia de utilizar huesos de adultos “jóvenes” para los estudios diagenéticos y paleodietarios porque aún no hay pérdida mineral considerable que interfiera con la información que se requiere para dichos objetivos. No es raro, sobre todo en mujeres que han pasado la menopausia, que los procesos de resorción sean más intensos que los procesos de neoformación, hasta un punto que no pueden considerarse normales; en consecuencia, el hueso se vuelve anormalmente poroso y frágil, trastorno denominado osteoporosis.

En la osteoporosis básicamente hay atrofia ósea con adelgazamiento y escasez de trabéculas. Los huesos son menos densos, especialmente en la columna, las vértebras adoptan una morfología bicóncava y es muy frecuente en la mujer sobre todo a partir de los 49 años. Los estudios diagenéticos en esqueletos con osteoporosis no necesariamente pueden estar alterados, ya que se sabe qué huesos están afectados por dicha anomalía y, en consecuencia, se pueden seleccionar aquéllos que escapan a esta alteración; y además, es posible

utilizar osamentas que al momento de la muerte aún no llegan a las etapas adultas.

Hay otras osteopatías metabólicas que tienen relación con anemias por deficiencia de hierro en la sangre. Las anemias se difundieron por todo el mundo, pero en tiempos antiguos, en el Viejo Mundo eran más frecuentes en la cuenca del Mediterráneo. Se sabe de la hiperostosis porótica y la *cribra orbitalia*. La primera se manifiesta en el cráneo, el diploe se engrosa a expensas de la tabla externa que se hace muy delgada. Esta alteración suele predominar en el hueso frontal y en la porción anterior de ambos parietales, también se observa en la parte posterior en el área lambdoidea; su aspecto es granular. También hay alteraciones similares en los cuerpos vertebrales, costillas y pelvis. Para el caso de la *cribra orbitalia* se notan pequeños orificios finos en el tercio anterior del techo de la órbita. No obstante, estas alteraciones no interfieren en los estudios diagenéticos, porque la hidroxiapatita contiene los mismos minerales a pesar de la alteración física del hueso.

## 2. Biología del hueso

El hueso humano, de origen arqueológico, es una de las principales fuentes de información para el estudio de la vida de las poblaciones pasadas. Por medio de los métodos utilizados en osteología, se ha logrado, desde sus orígenes, dar explicaciones de la variabilidad humana en los diversos contextos evolutivos. Los huesos son los órganos de color blanquecino duros y resistentes, que forman parte del cuerpo humano; su unión da lugar al esqueleto. Los huesos tienen funciones mecánicas y biológicas. Las primeras se relacionan con el sostén para la inserción de tejidos y órganos blandos; de movimiento, porque en los huesos se apoyan los músculos somáticos. Las articulaciones son móviles para poner en movimiento el aparato locomotor dirigido por el sistema nervioso. Las funciones de protección consisten en cubrir las estructuras vitales; las vértebras forman un canal óseo que resguarda la médula espinal; el cráneo protege el encéfalo y la caja torácica protege corazón y pulmones. Dentro de las funciones biológicas se

destaca el metabolismo mineral, porque los huesos son un depósito de sales minerales (P, Ca y Fe) y vitaminas (A, D y C); y la acción hemopoyética, por medio de la médula ósea roja, que en el adulto se encuentra mayoritariamente en esternón, costillas, cuerpos vertebrales, díploe de huesos craneales y epífisis proximales de fémur y húmero (Lagunas 2000).

El proceso de creación del hueso en el organismo se llama osteogénesis, que se refiere a la formación de todos sus componentes, no sólo a su contenido mineral. Las células del hueso encargadas principalmente de su formación y resorción son los osteoblastos, los osteocitos y los osteoclastos. Los osteoblastos son las células formadoras de hueso que secretan el colágeno, formando una matriz alrededor de sí mismos que luego se calcifica. Los osteocitos son células óseas rodeadas por una matriz calcificada que envían prolongaciones por el sistema de conductos que se ramifican por todo el hueso. Los osteoclastos son células multinucleadas que erosionan y resorben el hueso previamente formado.

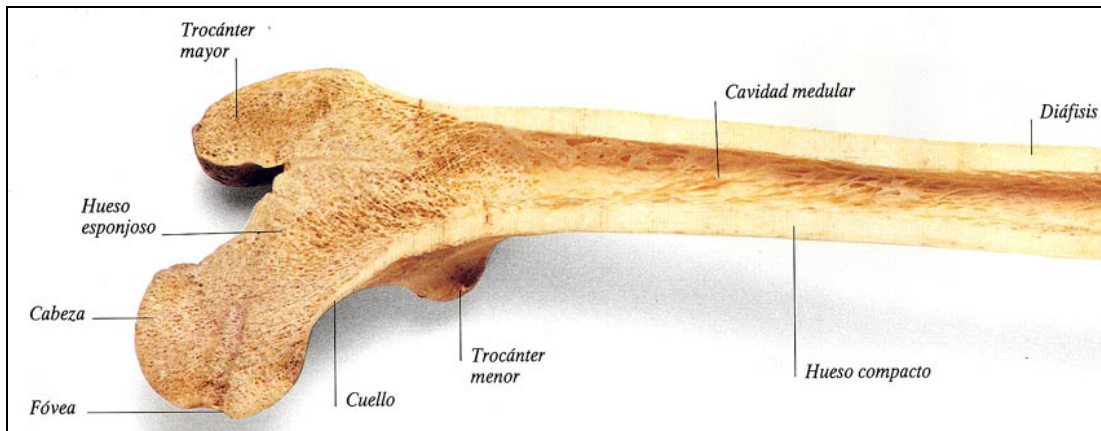
En condiciones normales, el proceso de calcificación comienza al formarse la sustancia orgánica intercelular. Aunque se ha sugerido que la formación del cristal puede empezar en el hueso sin que se alcance la supersaturación de iones de Ca y de P en la solución. El primer depósito mineral en el hueso no es cristalino sino amorfo, un precipitado de fosfato de calcio. Mas tarde, la sal ósea se vuelve cristalina. Los cristales son alargados, como bastoncillos que aparecen en estrecha relación con las microfibras de colágena. Es probable que la composición de los cristales que se forman primero en el hueso pueda alterarse, porque los diferentes iones que contiene se intercambian con los del líquido tisular. El mineral que se deposita recientemente en el hueso es más frágil que el que ya tiene algún tiempo (Ham 1970).

Los iones de la sal del hueso son principalmente, Ca, PO<sub>4</sub>, OH y CO<sub>3</sub> (Hidroxiapatita). También hay en el mineral pequeñas cantidades de magnesio, sodio, hierro e iones de citrato (Ham 1970). “Los cristales del mineral del hueso son bastante pequeños, en el orden de 15-79 nm en sus dimensiones más grandes y aproximadamente 5 nm en la parte más gruesa de su dimensión más pequeña” (Sillen 1989: 213). La baja relación Ca/P de la apatita del hueso está

relacionada con su escasa cristalinidad; los cristales pequeños tienen un área (superficie/proporción) de masa alta, y hay generalmente más capacidad para la sustitución y absorción en la superficie del cristal que en el interior. “Se ha mostrado que las apatitas con deficiencias de calcio son altamente reactivas cuando son expuestas a soluciones que contienen calcio. Por lo tanto, con la diagénesis se espera un incremento en la proporción Ca/P” (Sillen 1989: 218 -19).

El primer hueso que se desarrolla en la vida embrionaria recibe el nombre de hueso no maduro, y proporcionalmente tiene más células, más colágena y menos sustancia de cemento y mineral que el hueso maduro, que se forma más tarde y constituye la mayor parte del esqueleto. Proporcionalmente, el contenido de sustancia de cemento en la fracción intercelular es menor que en el hueso maduro; por lo tanto, el hueso no maduro probablemente capta menos mineral que el maduro, y en consecuencia, no es muy firme. La mayoría del hueso no maduro, que se forma durante la vida embrionaria, más adelante es sustituido por el maduro. El hueso maduro tiene una regularidad muy marcada en sus laminillas, tiene más sustancia de cemento y por lo mismo capta más mineral.

Hay dos tipos de tejido durante el desarrollo del hueso; el esponjoso y el compacto (Figura 1). Cuando ya se han formado redes de hueso esponjoso, el siguiente que se forma es sobre todo de la variedad madura. Si en una red esponjosa se añaden nuevas laminillas óseas, a los lados de las trabéculas, los espacios que quedan entre ellas se estrechan en forma correspondiente. El constante depósito de laminillas frescas de hueso, en las trabéculas que circundan los espacios, pronto modifica su carácter, cambiándolo de una estructura de grandes espacios con poco hueso a otra de espacios reducidos con mucho hueso. Cuando en lugar de los espacios llega a predominar la sustancia ósea, se dice que el hueso es compacto y denso (Ham 1970).



*Figura 1.* Sección de un fémur para mostrar la diferencia estructural que hay entre el hueso esponjoso (izquierda) y el hueso compacto (derecha). En el presente estudio se utilizó la diáfisis de los huesos. El hueso esponjoso es más susceptible a la diagénesis por su mayor porosidad en comparación con el hueso compacto

Esta diferencia en el tejido óseo, esponjoso y compacto, tiene mucha relevancia en los estudios diagenéticos, precisamente por los distintos espacios porosos en los huesos. Hay una extensa literatura que indica que los huesos compactos tienen menos contaminación durante el enterramiento promovida por el escaso espacio poroso que tienen, en donde las reacciones químicas de sustitución iónica, entre la química del suelo y la química del hueso, son lentas, en comparación con las reacciones rápidas que suceden en los huesos con predominancia de tejido esponjoso. Por su estructura más abierta, el hueso esponjoso es visto como más susceptible a la alteración diagenética que el hueso de las superficies. Un ejemplo es el diente; la densidad alta y la porosidad relativamente baja del esmalte lo hace menos susceptible, en comparación con los huesos del esqueleto, al cambio diagenético.

El hueso es un tejido que integra fosfatos de calcio inorgánicos precipitados sobre una matriz de colágeno orgánica. Su composición varía considerablemente con la edad y el tipo de hueso. El hueso cortical total es aproximadamente 69% inorgánico, 22% orgánico y 9% de agua. La hidroxiapatita es la fase fosfato de calcio dominante en el mineral del hueso. Las etapas inmaduras más solubles sólo ocurren en la superficie endóstica, subperióstica, cortical y haversiana. La composición de cada una de estas fases de fosfato de calcio está a expensas de

las sustituciones iónicas por carbonato, citrato y otros numerosos elementos traza secundarios suministrados por los alimentos y el agua ingerida durante la vida del organismo.

Como ya se comentó en líneas anteriores, las concentraciones de los elementos principales en el hueso a lo largo de la vida, como el Ca y P, dependen de varios factores relacionados con la fisiología del organismo. El Ca forma parte del hueso y más de 95% de este elemento se encuentra en el esqueleto. Además, es sustancial para muchas funciones del organismo, como la contracción muscular, la coagulación de la sangre y los impulsos nerviosos, por dar algunos ejemplos. El Ca se absorbe en el intestino delgado, sobre todo en su parte alta. Los iones de Ca ( $\text{Ca}^{++}$ ) y fosfato ( $\text{HPO}_4^-$ ) se combinan y forman fosfato cálcico ( $\text{CaHPO}_4$ ) que abunda en la dieta. Las condiciones que acidifican el contenido intestinal promueven la mayor absorción del Ca y la alcalinidad la deprime. Por eso se absorbe más Ca en la parte alta del intestino delgado, porque es el lugar donde al ingerir alimentos todavía el químico gástrico no ha sido totalmente neutralizado por los jugos alcalinos del duodeno y del intestino. El exceso de Mg, que se encuentra en algunas gramíneas, disminuye la absorción de Ca; por el contrario, con los azúcares en general puede aumentar el Ca absorbido como consecuencia del aumento de ácido formado a partir de ellos por los lactobacilos de la flora intestinal. La vitamina D fomenta la absorción de Ca y parcialmente la de P en la parte terminal del intestino delgado (Ganong 1986).

El Ca en los huesos está de dos formas, un tipo de Ca fácilmente intercambiable (reservorio) y un depósito de calcio estable que sólo es intercambiable lentamente. El Ca del plasma está en equilibrio con el Ca óseo fácilmente intercambiable. Su concentración está directamente influenciada por la hormona paratiroidea. El cuerpo adulto contiene aproximadamente 1100g de Ca, la mayoría en el esqueleto (Ganong 1986).

Por otra parte, la cantidad total de P en el cuerpo está en un rango de 500 a 800 g, de los cuales 90% se encuentra en el esqueleto. La cantidad de P, que normalmente entra al hueso, es de aproximadamente 3 mg al día, con una cantidad que sale igual por resorción. Su absorción también depende de la



hormona paratiroidea, se absorbe en el intestino delgado y el duodeno. El P de la dieta es absorbido en su mayor parte, a menos que en el intestino existan metales pesados, o un gran exceso de Ca, con los que forma fosfatos insolubles. Debido a la relación entre el Ca y el P, la absorción de este último aumenta si baja el Ca de la dieta. En general, el P se absorbe en forma de fosfatos inorgánicos que pueden originarse de algunos compuestos orgánicos (Ganong 1986).

### 3. Suelos

La vida de los seres humanos está relacionada con el suelo, dadas nuestras necesidades primarias desde hace miles de años. La antropología física, entre otras disciplinas afines, debe recurrir a excavaciones con el fin de obtener información relevante para la explicación de la vida de las poblaciones del pasado. Se requiere estudiar el suelo que ha servido de hábitat de las sociedades antiguas, desde diferentes perspectivas dependiendo de los objetivos de interés de las disciplinas antropológicas.

La edafología es la ciencia que estudia los suelos. El suelo es la parte de la corteza terrestre donde crecen las plantas y está constituido por rocas transformadas mediante la acción de la atmósfera y de los vegetales. En el suelo hay, además de los restos de las rocas, compuestos químicos inorgánicos, así como materia de origen orgánico. Entre estas transformaciones, están las que producen algunas bacterias que forman cuerpos compuestos de nitrógeno que son de gran importancia para la vida de los vegetales. También hay pequeños organismos como protozoarios, hongos y bacterias, así como animales pequeños, como las lombrices, que ingieren parte de los restos de materia orgánica y contribuyen también a mezclarla con la materia mineral. En el suelo también hay *humus*, que son los restos de materia orgánica descompuesta mezclada con materia mineral.

Todas las actividades realizadas por las poblaciones antiguas siempre estuvieron en interacción con los suelos de su entorno, ya sea para cultivar, para obtener materiales de construcción, utilizando plantas para su alimentación e,

inclusive, como parte de las costumbres para enterrar a sus muertos. Las poblaciones ya desaparecidas han dejado huella cultural y biológica, que hoy se puede recuperar, en parte, con el estudio de las características físicas y químicas de los suelos de los sitios arqueológicos.

Como en los sitios de enterramiento generalmente hay suelos y sedimentos, cabe aclarar que en este trabajo se hará referencia a los suelos. Ambos provienen de la descomposición de la roca; los suelos evolucionan en el mismo lugar y los sedimentos, después de su origen, tienen un transporte y una depositación; pero tanto los suelos como los sedimentos están en forma de partículas. Por este motivo, en los estudios de la química y física del suelo, dirigidos al estudio diagenético del hueso no es trascendente si se trata de un suelo o un sedimento, porque la base del estudio son las partículas, sobre todo del tamaño del limo y de la arcilla, que son las más activas químicamente en la diagénesis del hueso.

Para la explicación diagenética, también es indispensable el estudio del clima y de la vegetación de la zona geográfica del lugar de enterramiento. El clima es el factor fundamental en la distribución de los suelos y de las plantas. Son los fenómenos físicos de la atmósfera, controlados por la insolación, los que determinan los procesos fisicoquímicos del suelo y los biológicos de las plantas. Hay además una estrecha relación entre el suelo y la vegetación. La influencia de éstos es recíproca.

Por otra parte, para la explicación de los estudios diagenéticos es necesario describir la composición química y la estructura física del suelo, como base en el entendimiento de los intercambios químicos entre los elementos o compuestos del suelo y los correspondientes al hueso.

En la corteza terrestre se encuentran determinados elementos simples. Los más frecuentes (87.08%) son: oxígeno (O) (49.20%), Si (25.67%), Al (7.50%) y Fe (4.71%). Hay otros menos frecuentes (11.22%): Ca (3.39%), Na (2.63%), K (2.40%), Mg (1.93%) e hidrógeno (H) (0.87%). Hay otros seis elementos simples más (0.56%) que tienen gran importancia en la evolución de los suelos y en la composición de las plantas: Cl (0.19%), P (0.11%), Mn (0.09%), carbono (C)

(0.08%), S (0.06%) y nitrógeno (N) (0.03%). Estos elementos simples forman varios tipos de minerales. Los minerales más frecuentes en las rocas y los suelos son los siguientes: sílice ( $\text{SiO}_2$ , 59.08%); *sesquióxidos* de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 15.23%) y de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 3.10%); óxido de hierro ( $\text{FeO}$ , 3.72%) y óxidos formados con las bases, como óxido de calcio ( $\text{CaO}$ , 5.10%), óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ , 3.71%), óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ , 3.45%) y óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ , 3.11%). También hay otros cuerpos compuestos más agua ( $\text{H}_2\text{O}$ , 1.30%). En la mayoría de los entierros prehispánicos directos, el contacto entre el esqueleto y el suelo, después de que las bacterias y microorganismos destruyen el tejido blando, y la pérdida de los materiales del bulto mortuario provoca una interacción inmediata entre la química del tejido óseo con la química del suelo. La rapidez de estas reacciones químicas se deben, en gran medida, al pH del suelo, y dependiendo de los valores de este marcador químico sucederán una serie de reacciones complejas que están en función del clima y de las características físicas del suelo, en cuanto a la capacidad de éste para permitir el paso del agua a través de sus diferentes estratos (Vivó 1972).

Los minerales forman las rocas de la corteza terrestre sobre las que actúa la atmósfera por medio del clima, sobre todo, a través de la temperatura y la lluvia. Esta última es el principal agente de intemperismo, y la temperatura aumenta la descomposición química o rompe en pedazos las rocas. A estos elementos atmosféricos deben añadirse las aguas de escurrimiento sobre la superficie terrestre, porque quitan, acarrean y depositan los materiales produciendo los terrenos aluviales.

De la vegetación ya se ha dicho que también tiene un papel trascendente en la intemperización, porque las plantas toman, a través de sus raíces, el agua y los elementos de nutrición que alteran la composición química del suelo. Los cambios químicos pueden ser, en consecuencia, de dos clases: desintegración y descomposición. La primera se refiere a la división de la roca en pedazos cada vez más pequeños y, la segunda, a la alteración en la composición química de la roca. Todos estos procesos de cambio químico tienen lugar en una capa de la corteza terrestre que sólo tiene entre unos centímetros y unos metros de espesor.

En este sentido, la proporción de la intemperización depende de los siguientes factores: acción de los agentes de intemperización (lluvia y temperatura), vegetación, dureza de la roca, inclinación de la superficie terrestre y tiempo. La intemperización es lenta en climas fríos o secos, y rápida en climas calientes o lluviosos (Vivó 1972).

Además, la estructura física de los suelos consiste en compuestos de materia inorgánica sólida, materia orgánica muerta, materia orgánica viva (raíces de las plantas, pequeños animales, bacterias y hongos), agua, sales solubles y aire. La materia inorgánica sólida está compuesta de partículas de diferente tamaño, que caracterizan la textura del suelo. Las partículas se clasifican, de acuerdo con su tamaño, en los grupos siguientes (Cuadro 2).

*Cuadro 2*  
Clasificación de las partículas del suelo

Separado	Diámetro mm <sup>a</sup>	Diámetro mm <sup>b</sup>	No. de partículas por gramo	Área superficial en 1 g/cm <sup>2</sup>
Arena muy gruesa	2.00 – 1.00	-----	90	11
Arena gruesa	1.00 – 0.50	2.00 – 0.20	720	23
Arena mediana	0.50 – 0.25	-----	5700	45
Arena fina	0.25 – 0.10	0.20 – 0.02	46 000	91
Arena muy fina	0.10 – 0.05	-----	722 000	227
Limo	0.05 – 0.002	0.02 – 0.002	5 776 000	454
Arcilla	Menor de 0.002	Menor de 0.002	90 260 853 000	8 000 000 <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Sistema del United States Department of Agriculture.

<sup>b</sup> Sistema de la International Soil Science Society.

<sup>c</sup> Área superficial de partículas de arcilla montmorillonita con forma de placas, determinada con el método de retención de glicol por Sor y Kemper. Otros separados supuestos con base en esferas y cálculos basados en el mayor tamaño permisible.

(Fuente: Foth 1997)

Así, hay generalmente suelos con partículas de arena, de limo y de arcilla. El análisis de la textura del suelo de un sitio arqueológico da información acerca de los procesos de lixiviación que afectan la química y la física de los esqueletos

ahí enterrados; porque dependiendo de la cantidad de agua que penetra, será la intensidad de las reacciones químicas que ponen en solución los elementos del hueso y los elementos del suelo que inmediatamente forman compuestos que pueden precipitarse sobre o en el interior de la estructura del hueso.

Los suelos tienen distintas capas horizontales superpuestas: a) capa de tierra vegetal con hojas y restos de materia orgánica transformada en *humus*, (zona de material grueso y donde hay procesos de lixiviación), b) capa de material lixiviado (una zona de material fino y de acumulación), c) capa de la roca madre (zona de material de arena, arcilla y grava o de la roca madre intemperizada) y d) capa del subsuelo de roca madre.

El agua es el factor principal en las transformaciones químicas del suelo, por este motivo, influye de una manera muy notable en sus propiedades fisicoquímicas. El agua proviene de la lluvia; parte se evapora o es transpirada por las plantas, y otro tanto se escurre sobre la superficie acarreado partículas del suelo. Otra parte del agua, que es perjudicial para el estado físico y químico del hueso, penetra en los estratos del suelo llegando, inclusive, a las capas más bajas por gravedad. El agua en forma de vapor también penetra en el suelo y parcialmente vuelve a salir a la superficie. Otra más se mantiene en la superficie del suelo sin que se mueva libremente, no forma soluciones ni se encuentra en forma de vapor. Por último, en algunos casos, el agua se mueve por capilaridad en los poros del suelo o alrededor de los granos finos.

Con estas características descritas de los suelos, nos damos cuenta que el clima influye fuertemente en los cambios diagenéticos. Las variables en la degradación del hueso dependen de la alternancia húmedo-seco que hay en los contextos de enterramiento. Por ejemplo, en el hueso “el ataque al colágeno es menos pronunciado en ambientes secos que en húmedos” (Lyman 1994: 418). Cuando el tejido óseo pierde parte de su composición orgánica, su estructura cristalina queda más expuesta, junto con los iones del suelo, a cambios químicos pronunciados a través del tiempo, de esta forma, comienza la remineralización por la infiltración de minerales que están en la solución y que penetran en los poros del tejido.

También se ha propuesto que la degradación del colágeno influye en los cambios cristalográficos del hueso, pudiendo ser acelerados durante y después de la descomposición de la fase orgánica; todo ocurre desde que los cristales de apatita llegan a estar incluso más expuestos a los iones del suelo. En el periodo temprano, después del enterramiento, el mineral puede estar parcialmente protegido de la diagénesis por medio de la fase orgánica (Sillen 1989).

En determinadas circunstancias, donde los suelos son húmedos, los microorganismos atacan el colágeno; estos organismos excretan ácidos orgánicos que causan la disolución del mineral y, por tanto, la destrucción de la estructura histológica. Nuevos minerales pueden depositarse en el espacio vacío a expensas de los minerales viejos. Dado un escenario de disolución y recristalización mínima, las propiedades de la apatita determinarán la dirección del proceso diagenético. Primeramente, la apatita tiene la capacidad de promover el crecimiento de nuevos cristales. Secundariamente, la apatita, especialmente la variedad de cristales pequeños, está propensa a la sustitución por una variedad de especies iónicas, dependiendo de las condiciones de precipitación. Otras especies de cristales, como la calcita, pueden también existir en hueso antiguo (Sillen 1989).

Por otra parte, con valores de pH bajos, las colonias de hongos son capaces de activar su crecimiento. En un suelo con pocos nutrientes, los huesos enterrados pueden servir como un reservorio rico en nutrientes y ser un medio de crecimiento preferido. Pero si el agua se está moviendo continuamente a través del suelo, la constante filtración producirá un medio aún más ácido e incrementará la solubilidad de los componentes en el suelo como níquel, hierro y aluminio, en tanto que en los suelos neutros o más alcalinos, aumentan los organismos. Sin embargo, en los ambientes de suelos más ricos en nutrientes, los huesos enterrados no necesariamente son un medio de crecimiento preferido. Más aún, cuando los microorganismos alteran la estructura histomorfológica del hueso enterrado, sobre todo en suelos alcalinos, la preservación de la estructura total puede ser mejorada a través de la subsecuente acumulación rápida de carbonato de calcio en el tejido. En suelos alcalinos, los derivados de piedra caliza, el calcio existe primariamente como un carbonato y se acumula como tal en el hueso, pero

en suelos ácidos, libres de calcio, queda en la forma iónica y no es acumulado en los huesos enterrados (Hanson y Buikstra 1987).

Los suelos ácidos disuelven la hidroxiapatita, pero no es claro el rango de pH. Con  $\text{pH} < 5$  se promueve la desmineralización. El hueso se conserva mejor en suelos con pH neutro o muy ligeramente alcalino. Por este motivo, es más probable recuperar ciertas partes del esqueleto que otras, dentro del contexto de enterramiento. “Se desintegra más rápido un resto óseo de infante o adulto porque están descalcificados” (Walker *et al.* 1988: 183); por lo tanto, la diagénesis de acuerdo con las edades al momento de la muerte puede ser diferencial.

Los mecanismos primarios de la diagénesis *post mortem* en el mineral del hueso son: 1. precipitación de fases minerales separadas; por ejemplo, calcita, en pequeños espacios y en fracturas; 2. intercambio iónico entre la solución del suelo y las posiciones del entramado del fosfato de calcio y; 3. recristalización y maduración del cristal, involucrando la conversión de hidroxiapatita biogénica y microcristalina a una más grande y más bien cristalizada apatita geológica. “Las pruebas de modelos geoquímicos, dirigidos a la composición elemental de estas fases *post mortem* en el hueso, dependerán del dato preciso sobre la composición iónica de la solución del suelo bajo diferentes condiciones del terreno” (Pate y Hutton 1988: 730).

En ambientes áridos, con suelos alcalinos, salínicos o sódicos, la solución de cationes está referida tanto a iones solubles y a cationes de capas hidratadas limitantes como a iones intercambiables. Los iones intercambiables contribuirán de manera más amplia a la solución del suelo en climas más húmedos o en áreas donde se practica la irrigación. Bajo condiciones alcalinas de tierras más áridas, el hierro y aluminio ocurrirán como relativamente óxidos insolubles e hidróxidos; y el P como Ca escasamente soluble y fosfato de magnesio. Además, el P y metales pesados como el Cu, Zn, Co, Mn, Pb y Ni, estarán totalmente indisponibles para la solución, por la absorción de especies iónicas a través de arcillas (caolinita e illita) y a través del hierro, aluminio y óxidos de manganeso e hidróxidos. Por lo tanto, la mayoría de los iones de la solución del suelo derivan de carbonatos solubles en agua, sulfatos y sales clorhídricas de Ca, Mg, K y Na. Estas sales se acumulan en

medios ambientes áridos, ya que la precipitación anual es insuficiente para filtrar los suelos más allá de profundidades de 0.7 - 1 m (Pate y Hutton 1988).

Finalmente, junto con lo anterior, la adición de minerales por la diagénesis y el intercambio iónico entre el hueso y su medio de depósito pueden introducir elementos del suelo que están en concentraciones bajas e inmedibles en los huesos. En un análisis, la presencia de estos elementos sugiere que también podrían ser adiciones de otros contaminantes.

#### 4. Tafonomía ósea

Surgida de la paleontología, la tafonomía es el estudio de los cambios que ocurren en las plantas y animales después de su muerte. Para el caso de la antropología física este concepto ha tenido modificaciones en su aplicación. Dado que el hueso es el material predominante que sobrevive en el contexto arqueológico, es factible utilizar el concepto "tafonomía" como la ciencia de las leyes del entierro. Esta definición fue dada por el paleontólogo ruso I. A. Efremov a partir de las palabras griegas *taphos* (entierro) y *nomos* (leyes) para describir la subdisciplina de la paleontología que estudia los procesos que operan sobre los restos orgánicos, tanto en animales como humanos, desde el momento de la muerte hasta generar depósitos esqueléticos arqueológicos (Lyman 1994).

La palabra tafonomía se refiere a múltiples factores: procesos naturales y procesos de manipulaciones producidas por la acción humana; en los primeros, se trata de marcas de raíces sobre los huesos, fracturas producidas por la presión de la tierra, los efectos de la acidez o alcalinidad de los suelos, la acción de los roedores o depredadores, el daño que causan los microorganismos que habitan en los suelos, entre otros causantes; y segundo, se incluyen huellas de corte para desarticular o descarnar un cadáver, los cambios provocados por la cocción de algunas partes del cuerpo y el daño causado por rituales de enterramiento.

Después de la muerte se desencadenan todos los procesos que conllevan la putrefacción; y cuando el cadáver queda en contacto con cualquier contexto sedimentario, los huesos son afectados, en mayor o menor medida, por los



cambios químicos que son consecuencia de la descomposición de los elementos no minerales, para que posteriormente comiencen los procesos diagenéticos sobre la fracción mineral. La química del sedimento, porosidad y peso, son los factores tafonómicos trascendentes. Por este motivo, es fundamental conocer el contexto del hallazgo para una más correcta interpretación antropológica dirigida hacia el estudio diagenético.

Algunos diagnósticos de las modificaciones naturales del hueso requieren su contraste con las alteraciones que se incluyen en la disciplina de la tafonomía. Esta disciplina ha experimentado un constante desarrollo dentro de la comunidad científica, no obstante, es necesario seguir unificando conceptos que sean útiles para la aplicación experimental con un enfoque hacia la comprensión de la diagénesis del hueso. Los estudios diagenéticos pueden ser de utilidad en la interpretación de las marcas en los huesos provocadas por las conductas funerarias, o daños por agentes tafonómicos naturales, como los roedores, raíces u otros objetos presentes en el contexto de enterramiento que dejan su marca.

Debido a que en la interpretación tafonómica intervienen una serie de variables, es necesario considerar que los modelos de contaminación *post mortem* nunca pueden ser iguales; la ventaja es que sí hay variables universales que tienen relación con la diagénesis del hueso, como el pH y la humedad de los contextos de enterramiento, variables discutidas a lo largo de este trabajo. En cuanto al sitio arqueológico, también es preponderante el clima (la temperatura y la lluvia) y la profundidad de enterramiento; y en relación con las osamentas, se requiere enfocar el problema hacia el tipo de hueso y la edad al momento de la muerte, porque no todos los huesos tienen idénticas probabilidades de preservación.

Para Behrensmeyer (1991), hay considerables modificaciones biológicas y físicas entre el tiempo de la muerte y el enterramiento final. Es evidente que algunos cambios *post mortem* en el esqueleto pueden producir, en algunos casos, interpretaciones antropológicas inapropiadas, dependiendo de la habilidad del investigador, por lo que debemos tener bien presentes las alteraciones que ocurren antes y después del enterramiento. Por ejemplo, en tiempos

prehispánicos, las temperaturas de cremación, por actos funerarios, produjeron fracturas longitudinales en el hueso largo que requieren su análisis detallado para descartar procesos tafonómicos naturales. Los suelos ácidos generan daños en la fracción mineral que tiene similitud con los efectos de la osteoporosis. La presión del suelo produce fracturas. La precipitación de carbonato de calcio proveniente de los sedimentos puede confundirse con cálculos dentales. Los depósitos de carbonato de calcio en la superficie cortical de hueso largo pueden confundirse con la periostitis superficial.

Los agentes microbiológicos pueden generar ácidos que afectan los canales haversianos y son capaces de disolver el mineral del hueso, generando patrones irregulares en la histología; en este caso, la superficie externa del hueso se nota erosionada produciendo patrones parecidos a la periostitis. Los carroñeros atacan la región supraorbital y los insectos, que penetran en algunas secciones anatómicas, causan deterioros semejantes a la osteitis o traumas. Las piedras o materiales metálicos confunden con marcas de canibalismo. El agua pone en solución la fracción mineral produciendo procesos parecidos a los de algunas enfermedades. Las raíces y los cambios drásticos de temperatura provocan fracturas en el hueso. Como en la mayoría de las ocasiones, la pelvis, la escápula el cráneo, las costillas y las vértebras son las secciones anatómicas más propensas a los efectos tafonómicos (Aufderheide y Rodríguez-Martín 1998).

Por lo anterior, las alteraciones del hueso, por causas químicas, deberían considerarse en todas las investigaciones sobre los procesos tafonómicos culturales. Como es notorio, durante la transformación de los restos esqueléticos se entrecruzan numerosos factores físicos, biológicos y químicos que condicionan su diagénesis. En realidad, esos procesos tafonómicos hacen que, en determinadas circunstancias, se pierda una parte de la información que se podría conseguir si todo quedase como en el momento del depósito. Aunque también pueden ser una valiosa fuente de información sobre el medio y las circunstancias en que se produjeron los cambios hacia la explicación antropológica.

## 5. Diagénesis

El concepto “diagénesis” es utilizado en geología para señalar el proceso mediante el cual se modifican los sedimentos o rocas sedimentarias. Los antropólogos lo han adoptado para referir los cambios *post mortem* que tienen los constituyentes químicos del hueso una vez depositado en el suelo. Es decir, la diagénesis involucra todos aquellos cambios físicos y químicos que ocurren en el hueso durante el enterramiento, sobre todo cuando comienzan las reacciones químicas entre las propiedades del hueso y las características químicas del suelo; considerando sobre todo, la naturaleza de los huesos y las propiedades del suelo, que incluyen, el drenaje, la humedad y la permeabilidad para el paso de aire y agua (Sandford 1993).

“La diagénesis del tejido esquelético es afectada por factores intrínsecos; el tejido del organismo, tamaño, porosidad, estructura química y molecular; y por factores extrínsecos, como el pH del sedimento, regímenes de agua y temperatura y acción bacterial” (Lyman 1994: 417). Es evidente que los procesos diagenéticos incluyen muchas variables y una de las más primordiales es la estructura porosa del hueso donde regularmente ocurre una sustitución iónica de los minerales de la apatita con otros minerales del suelo.

Como se comentó anteriormente, la diagénesis es más severa en los huesos donde predomina el tejido esponjoso. Los cambios químicos de iones entre el tejido y la matriz del suelo son mayores en las áreas más expuestas de la estructura del hueso, porque el agua penetra más fácil debido al espacio poroso grande; por este motivo, las reacciones químicas son constantes en todo el hueso, provocando que los elementos o compuestos presentes en la solución del suelo se precipiten con más regularidad bajo condiciones severas de humedad (Hanson y Buikstra 1987).

Aún no hay suficiente información para predecir dónde la diagénesis estará completamente eliminada y dónde no, ya que la recristalización y la incorporación estructural del carbonato, por ejemplo, puede o no ocurrir (Sillen 1989). Se han recomendado tres procedimientos para reducir los efectos de la diagénesis. Éstos

incluyen limpieza física y limpieza química a través de lavados con ácidos y con un agente reductor. Se plantea que estos procedimientos usualmente remueven los contaminantes principales, haciendo factible la cuantificación de los elementos propios del hueso dirigida a la investigación de las dietas pasadas. Sin embargo, aunque estos métodos para la limpieza del hueso están destinados a diferentes grados de alteración, donde la limpieza física remueve la contaminación de la superficie y la limpieza química tiene un resultado uniforme sobre todo el hueso, es factible que el tratamiento químico puede remover los componentes biogénicos del hueso (Price *et al.* 1992).

“El efecto de la diagénesis del hueso ha sido debatido a través del desarrollo de los análisis de elementos químicos, como un medio para reconstruir dietas prehistóricas” (Hanson y Buikstra 1987: 549). Estos estudios apuntan que debería ponerse atención en los efectos a menudo inesperados y usualmente impredecibles de la erosión biológica y química en el hueso arqueológico. La inferencias dietarias y sobre salud muestran cómo la química del hueso y su contenido mineral pueden estar sesgados. El incremento en el uso de métodos analíticos complejos para evaluar paleodietas ha enfatizado la necesidad crítica por una consideración más cuidadosa de la diagénesis del hueso y los factores y mecanismos responsables de su preservación diferencial (Hanson y Buikstra 1987).

Para los estudios de la diagénesis es indispensable aplicar una serie de técnicas analíticas que permitan delimitar la muestra de estudio. Como se describió en el capítulo 2, algunos antropólogos han estudiado la densidad de huesos humanos usando un absorciómetro de fotones. Esta técnica fue desarrollada en los años sesenta (Lyman 1984). No obstante, es posible hacer estudios de densidad y porosidad del hueso por medio de otras técnicas, como las aplicadas en este trabajo, y que evidentemente dan las primeras aproximaciones al estado físico y químico del hueso, dirigidas a estudios más detallados. Una vez que se conocen dichas características del hueso, se puede definir la muestra de estudio. En particular, la densidad y la porosidad dan una clara y directa indicación del grado de cambio diagenético; sobre todo tomando en cuenta que una mayor

densidad y menor porosidad en comparación con el hueso moderno, están indicando un agregado de minerales en el hueso, producto del lugar de enterramiento. Hay alteraciones estructurales en la histomorfología, por la disolución de hidroxiapatita, seguida por una remineralización que involucra iones desde el mineral del hueso disuelto y la solución del suelo (Hedges y Millard 1995).

Se han observado diferencias en las concentraciones medias y en la variabilidad de los elementos (Ca, P, Sr, Ba, Mn, Fe, Zn, Cu y V) entre áreas estructuralmente intactas y alteradas, que varían de acuerdo con los ambientes postdepositacionales locales. Las zonas estructuralmente alteradas exhibieron frecuentemente concentraciones elementales más altas y una variabilidad más grande que las regiones estructuralmente intactas (Greenlee 1996).

Con el tiempo se han llegado a proponer algunos intercambios claros en el hueso como consecuencia de las características del suelo; algunos ejemplos son: la sustitución de estroncio ( $\text{Sr}^{2+}$ ), plomo ( $\text{Pb}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y sodio ( $\text{Na}^{2+}$ ) por calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ); el reemplazo de iones hidróxilo ( $\text{OH}^-$ ) por iones de fluoruro ( $\text{F}^-$ ) y cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y el intercambio de fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) por iones de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (Sandford 1993).

La estructura y química del hueso garantizan, aparentemente, que interactuarán con la mayoría de los medios geoquímicos; su armazón histológica porosa permite una fácil invasión de microorganismos del suelo; y las fracturas, producidas por la erosión ayudan a la penetración de las aguas subterráneas, que son la base de las reacciones químicas que lo dañan.

## 6. Paleodieta

En antropología se utilizan diversos procedimientos para el estudio de dietas antiguas. Se efectúan análisis de huesos de animales encontrados junto a los esqueletos humanos excavados; de restos vegetales, como el polen, granos y frutos secos; de estrías dentarias, analizando su patrón dejado por el consumo de carne o de vegetales; de coprolitos, con el fin de encontrar en ellos semillas,

espinas, fibras y vegetales que no se alteran en la digestión; se complementan con observaciones del arte rupestre que representa las actividades en la obtención de alimentos, y a través de la cuantificación de elementos químicos que están presentes en pequeñas cantidades en el hueso (Campillo s/a).

El estudio de elementos químicos, en huesos arqueológicos, permite hacer una estimación de la dieta. La técnica se basa en la cuantificación de algunos elementos químicos en el hueso, como estroncio, bario y cinc, entre muchos otros. Los organismos herbívoros tienen mecanismos de eliminación de estos elementos en intestino y en riñón. Por su parte, el aparato digestivo de los carnívoros lleva a cabo una discriminación adicional que la hecha por las presas de las cuales se alimentan los carnívoros. El conglomerado de estos elementos en los huesos depende de su cantidad en la dieta. Las agrupaciones de Sr y Zn, respecto a las concentraciones de Ca, elemento mayoritario en el hueso, pueden ser buenos indicadores de los recursos vegetales y animales en la dieta (Campillo s/a).

Más de ocho elementos traza, o menores, son necesarios para el mantenimiento de la salud (Cuadro 3). La deficiencia de algunos acarrea efectos negativos en el organismo, sobre todo, disfunción de los órganos vitales. Aunque se sabe mucho, de la actividad en el cuerpo, de algunos elementos traza tóxicos (Pb), mercurio (Hg), arsénico (As) y (Cu), poco se sabe alrededor de la función metabólica de otros.

La ingestión de productos alimenticios no necesariamente equivale a la absorción del elemento expuesta en los tejidos del cuerpo, porque la absorción está profundamente influenciada por sustancias opuestas en la dieta, por regulación fisiológica de absorción o por el estado químico del elemento. Por ejemplo, los intestinos de mamíferos, activamente, aunque no absolutamente, discriminan la absorción de estroncio en favor de calcio (Aufderheide 1989).

No todos los elementos traza están presentes en la misma cantidad en todos los órganos del cuerpo; varios están repartidos diferencialmente. El yodo se concentra particularmente en la tiroides, es un elemento esencial en el desarrollo de la hormona tiroidea, y en el hueso deja pocas concentraciones. No obstante, que el Pb y el Sr comparten suficientes propiedades fisicoquímicas con el Ca, el

cuerpo deposita más de estos elementos en el mismo sitio de almacenaje en lugar del Ca en el hueso. Los valores cambian entre diversos elementos e incluso el mismo elemento en diferentes órganos, por ejemplo, la mitad del Pb en el cerebro de un adulto permanece sólo unas pocas semanas, en cambio en el hueso se queda por décadas (Aufderheide 1989).

*Cuadro 3*  
Características y funciones de algunos elementos traza

Elementos traza esenciales	Símbolo	Función	Recomendaciones diarias (mg)	Contenido normal en el hueso (ppm, polvo)	Síntomas o signos por deficiencias dietarias
Hierro	Fe	Principal transportador de oxígeno	10-20	?	Anemia, infección
Cinc	Zn	Metaloenzimas; energía y metabolismo del RNA	15	200	Desarrollo retardado, infecciones, inmadurez sexual
Cobre	Cu	Metaloenzimas; síntesis de hemoglobina	2-3	25	Anemia, hipoproteinemia en infantes; no vista en adultos
Yodo	I	Síntesis de hormona tiroidea	0.15	0	Hipotiroidismo; bocio
No esenciales no tóxicos	Símbolo	Función		Contenido usual en el hueso (ppm, polvo)	Síntomas tóxicos
Estroncio	Sr	Desconocida		100	Ninguno
Bario	Ba	Desconocida		2	Ninguno

(Aufderheide 1989)

La orina y las heces son las principales rutas de excreción de los elementos traza; los pulmones y la piel juegan un rol también relevante pero en circunstancias excepcionales. No obstante, la eficiencia excretoria varía enormemente entre los elementos. El Fe es primordial para el cuerpo, una parte de él es reciclado, y únicamente una pequeña fracción del total es excretado por las heces. Lo mismo sucede con el Pb, que es eliminado en bajas cantidades. Ba y Sr, elementos usados para estimar dietas del pasado, en el hueso decrecen a medida que la posición del organismo sube en la cadena alimenticia. Mientras que la correspondencia de Ba/Ca y Sr/Ca en el hueso refleja sus proporciones en la dieta, otros factores, además de la posición trófica, afectan las relaciones dietarias y, por lo tanto, las proporciones en el hueso. Esto implica que los alimentos altos en calcio, como vegetales con hojas, contribuirán con la mayoría de los minerales que forman parte del hueso y dominan la composición de éste, aun cuando estén presentes en cantidades pequeñas, por esta razón, la composición del hueso no debería ser interpretada como una medida proporcional carne/planta sino como una caracterización de cualquier elemento que contribuye al aumento de Ca (Burton 1996).

Probablemente todos los organismos vivos tienen necesidad nutricional de Fe. “Este es un componente esencial de la hemoglobina de los glóbulos rojos” (Aufderheide 1989: 215) entre otras funciones. El hierro es también necesario para la biosíntesis de la clorofila por las plantas verdes. En los animales superiores el hierro se almacena principalmente en el hígado, el bazo y en menor cantidad en la médula ósea, en forma de una proteína conjugada llamada *ferritina*, la cual contiene casi 25% de su peso en hierro. El hierro es transportado por la sangre, unido a una proteína específica de globulina en el plasma. Cerca de 70% del Fe total del cuerpo está presente en la hemoglobina, aproximadamente 3% en la *mioglobina*, 1% en *citocromos* y 25% restante en forma de *ferritina*.

El Zn, como elemento esencial para plantas, animales y microorganismos, es un metal componente de un cierto número de enzimas. En las plantas, el Zn está relacionado con el metabolismo de la clorofila, en la biosíntesis de una de las hormonas vegetales y en la producción de flores y semillas. En estudios anteriores



es frecuente la afirmación de que este elemento es uno de los más estables desde el punto de vista diagenético y, por lo tanto, más confiable para la interpretación paleodietaria.

En el pasado, las investigaciones de elementos químicos solamente examinaban estroncio y calcio. En la actualidad se hacen estudios en una variedad de elementos químicos que pueden ayudar a la comprensión de la dieta; no obstante, en estos estudios, sobre la base del contenido inorgánico del hueso humano, se necesita comprender las condiciones que promueven la diagénesis, los mecanismos que toman lugar y los elementos inorgánicos específicos que afecta. Más aún, es necesario desarrollar un criterio simple para saber si la diagénesis altera los niveles inorgánicos, con la finalidad de sustentar sólidamente las inferencias de dietas antiguas.

## Capítulo IV. Comunidad de Los Olmos, Estado de Hidalgo

### 1. Ubicación

La comunidad de Los Olmos se localiza al sur del Estado de Hidalgo y pertenece al municipio de Tizayuca; colinda al norte con la colonia de los Ángeles, municipio de Toluca; al sur, con la colonia El Cid; al este, con la colonia Mogotes y al oeste con la autopista México-Pachuca (Figura 2). Sus coordenadas geográficas, según la carta E14B11 del INEGI (1992c) son: 19° 53' al norte y 98° 55' al oeste. Para llegar al lugar, se utiliza la calle que está en la desviación del km. 57 de la carretera federal 85.

El estado de Hidalgo forma parte de la zona del centro del país y cuenta con 20 905.12 km<sup>2</sup> de superficie. Está conformado por 84 municipios, entre los que se encuentra Tizayuca. Su territorio está constituido por cadenas montañosas, lomeríos y llanuras, con algunos valles, mesetas y cañones.

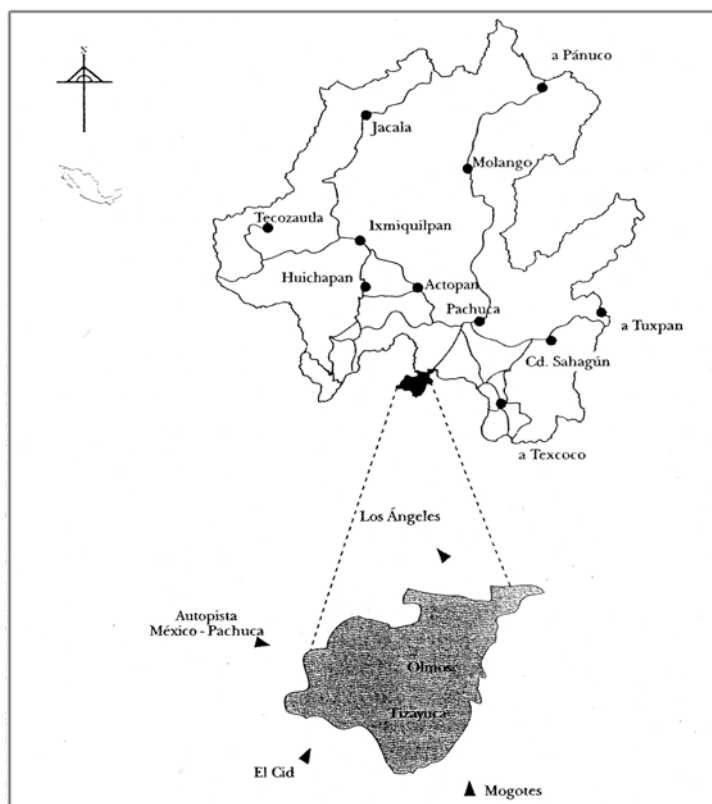
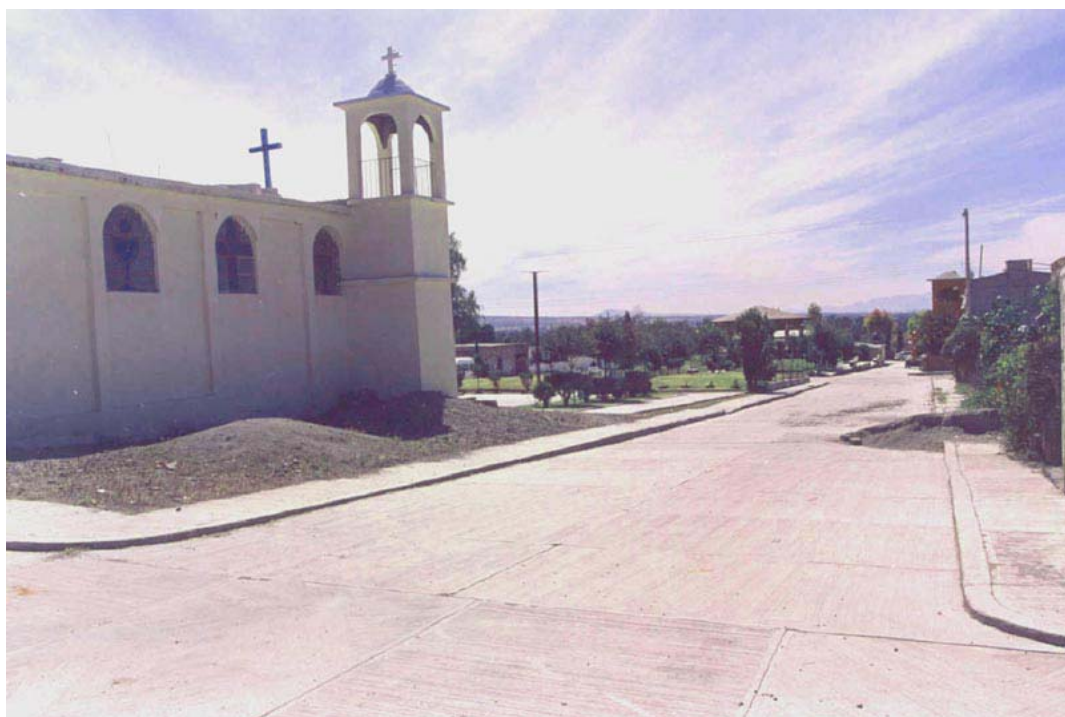


Figura 2. Mapa de ubicación de Los Olmos, Hidalgo

## 2. Historia

La comunidad de Los Olmos (Figura 3) se asienta sobre un sitio arqueológico bastante extenso. El nombre del pueblo antiguo quizá fue *Tetetzontilco*, cuyo significado en lengua náhuatl es “*el lugar donde hay tezontle negro*” (Sterpone 1995, 1997).



*Figura 3.* Actual comunidad de Los Olmos. Al fondo de la calle se localizaron restos arqueológicos del pueblo antiguo de Tetetzontilco. Foto: proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico

En los últimos nueve años se han realizado diferentes excavaciones por medio de las cuales se obtuvieron materiales arqueológicos que permitieron interpretar los periodos culturales correspondientes a la etapa del contacto español. Hasta el momento se sabe que en el límite sur de la comunidad se encuentran alrededor de diez montículos pequeños que tienen aproximadamente 20 m<sup>2</sup> de superficie, esto se demostró por los trabajos arqueológicos realizados en 1995 por el personal del Centro INAH Hidalgo. En algunos predios del poblado

encontraron cientos de tepalcates, que conformaron las vasijas con las cuales se alimentaban y festejaban los antiguos habitantes de Los Olmos. Posteriormente los arqueólogos plantearon que la antigua población había ocupado una superficie de aproximadamente 45 hectáreas (Sterpone 1995, 1997).

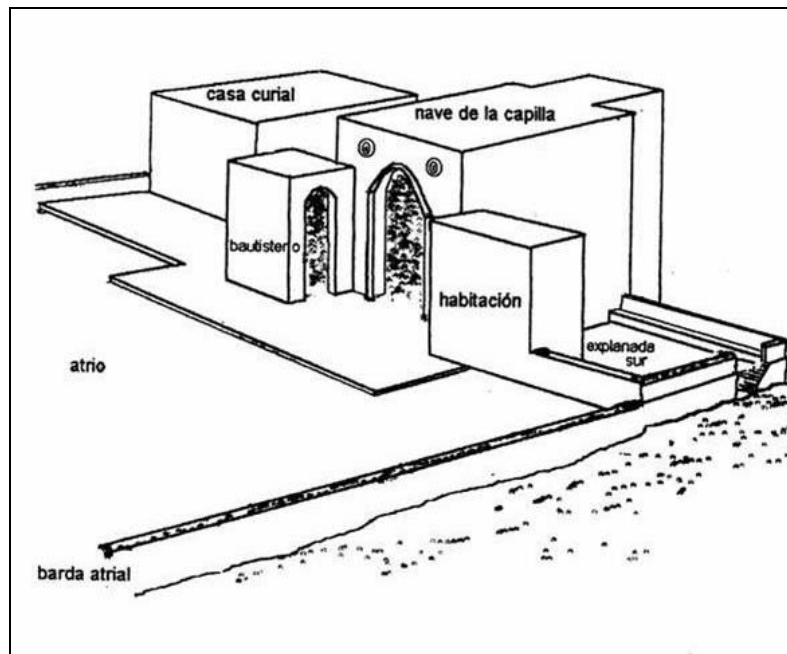
Hay dos etapas constructivas diferentes. Los arqueólogos relacionan la primera con la manufactura de cerámica que es semejante a la descrita por Cobean para el periodo de 950 – 1200 d. C. para la región de Tula. La segunda etapa está representada por el uso de cerámica *Loza Anaranjada Azteca III*, cuya ubicación temporal comienza desde el periodo Posclásico, y en Los Olmos su consumo parece extenderse hasta por lo menos el siglo XVI (Sterpone 1997).

Los datos arqueológicos muestran la presencia de un asentamiento extenso durante el Posclásico. A partir de las construcciones se manifiesta una secuencia ocupacional desde los inicios del segundo milenio después de nuestra era. Los trabajos de topografía, efectuados en los terrenos localizados a espaldas de la escuela primaria de la comunidad (Figura 4), indicaron que alguna vez existió en el lugar una plaza, alrededor de la cual se erigían una gran cantidad de casas de distintos tamaños y formas. Algunas deben haber sido de construcción más elaborada que otras (Sterpone 1995, 1997).

Los materiales arqueológicos indican que los últimos habitantes habían adquirido sus vajillas de cerámica decorada con diseño negro sobre anaranjado, el color natural del barro. Estas vajillas fueron hechas por artesanos quienes dotaban de productos a los mercados aztecas alrededor del año 1430. Los aztecas asumieron el control político y económico del Cemanáhuac; crearon una nueva división político territorial, construyeron y remodelaron ciudades donde se alojaron miles de personas, congregaron pueblos para regular las actividades sociales y económicas de la tierra. Fue un gran proyecto que culminó en 1519. La población antigua de Los Olmos, como otros cientos de asentamientos humanos de esa época, sufrieron la repercusión de los cambios ocurridos durante ese periodo de reorganización. Fue durante el siglo XV cuando este pueblo creció como una de las colonias importantes de Tizayuca. Esta última ciudad fue obligada a tributar a los aztecas en tiempos del reinado de Huitzilihuitl (Sterpone 1995, 1997).



*Figura 4.* En la parte trasera de la escuela primaria de la comunidad se puede apreciar parte del piso de la antigua capilla del siglo XVI, y hacia los árboles del lado derecho se localizó el Atrio.  
Foto: proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico



*Figura 5.* Reconstrucción de la capilla (Osvaldo Sterpone 1997). El interior de la nave de la capilla y el atrio se utilizaron como áreas de enterramiento. Fuente: proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico

De las diferentes etapas que se han reconocido se sabe que la última ocupación del sitio data del periodo colonial. Los entierros excavados y utilizados en este estudio están asociados a una capilla franciscana del siglo XVI (Figura 5).

El atrio y el interior de la capilla se utilizaron como áreas de enterramiento. Los entierros pertenecen a la categoría de enterramientos directos, de tipo primario, distribuidos en posición decúbito dorsal, con sus brazos cruzados sobre el pecho y sus piernas cruzadas en la zona de los tobillos (la epífisis distal de tibia y fíbula).

En el atrio los entierros fueron colectivos, y en el interior de la capilla se hallaron por debajo del piso de estuco, donde se procuró el espacio de forma individual; es decir, se retiró el piso para hacer las fosas. Después de colocar el cadáver se empleó una capa de sedimento y un revestimiento de rocas de tamaño mediano e inmediatamente se aplicó un piso nuevo de estuco (Figura 6).



*Figura 6.* Lugar de enterramiento en el interior de la nave de la capilla. Se aprecian las fosas individuales y el piso de estuco recubriéndolas. Foto: proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico

En el atrio se localizaron las osamentas de más de 100 individuos, neonatos, niños, jóvenes y adultos de uno y otro sexo, que fueron enterrados en el atrio de la capilla desde su fundación. En un principio, los entierros se hicieron en fosas simples muy cerca de la entrada de la iglesia; luego se utilizaron algunas fosas más alejadas para sepultar a varios individuos juntos, tal vez éstos hayan perecido durante las primeras epidemias de los años 1545-1548 (Sterpone 1995, 1997).

Todos los individuos, sin excepción, fueron sepultados con sus rostros dirigidos hacia la salida del sol. Esta característica indicó el éxito que tuvieron los misioneros para promulgar la *fe* entre los habitantes de la antigua población. En tiempos prehispánicos los entierros eran orientados hacia el norte y generalmente se les sepultaba con algunas pertenencias y regalos que los ayudarían en su peregrinación hacia el *Mictlán* (Sterpone 1997).

#### A. Condiciones de salud y nutrición de los pobladores de Tetetzontilco

Debido a que los análisis diagenéticos involucran el estado químico del hueso, fue necesario hacer referencia a un estudio antropofísico aplicado en los restos óseos excavados en la comunidad de Los Olmos, de mucha importancia para tener una aproximación de la condición química de los esqueletos antes del enterramiento. Meza (2001) estudió la muestra integrada por 66 osamentas de todas las edades. Su objetivo principal fue conocer las características de la población mediante los indicadores de salud y nutrición, como un primer acercamiento al conocimiento de las condiciones de vida de la población de Tetetzontilco.

La autora identificó, mediante las marcas que se observan en los restos óseos, problemas de salud, nutrición y actividades físicas; además, consideró elementos del ambiente, así como las condiciones culturales, sociales, políticas y religiosas. Señala, que:

las actividades económicas, base del sustento de las poblaciones hidalguenses, se efectuaron a través de dos tipos de labor: la agricultura y la minería; la primera, se

extendió mediante la implantación de “La Hacienda”, institución traída de Europa y adaptada a las necesidades y costumbres de estas tierras, que destacó por la producción pulquera de los llanos; la segunda, desempeñó un papel importante para esta población, como fue la producción de metales preciosos (Meza 2001: 31).

La agricultura fue uno de los elementos que en un principio sustentó la economía de este lugar, mediante el maíz, el frijol y el maguey. A través de la encomienda, los españoles reorganizaron las actividades productivas, utilizando la mano de obra para las nuevas empresas: haciendas y minas. Las nuevas condiciones hispanas para la distribución de los trabajos alentaron los abusos de los españoles hacia los indígenas y de éstos entre sí, favoreciendo el aumento de enfermedades (Meza 2001).

De los indicadores de salud y nutrición, la *cribra orbitalia* en los adultos de ambos sexos la autora notó una semejanza. La mayor presencia de esta lesión se presentó en la fase inicial y una minoría en la etapa severa. “La alteración que padecieron los pobladores de Tetetzontilco, pudo haber sido por una anemia, causada probablemente por el consumo continuo de alimentos con niveles altos de carbohidratos, atribuidos al maíz” (Meza 2001: 61). En relación con la hiperostosis porótica (inicial), diagnosticada en 61.2% de la muestra estudiada, indicó que los individuos padecieron anemia. Sobrevivieron a un cierto periodo de tiempo después de que se manifestara dicha lesión, que también fue provocada por una alimentación escasa y mal balanceada. Aunado con lo anterior hay que incluir las enfermedades intestinales y un posible acceso diferencial a los recursos.

También realizó el estudio de las enfermedades degenerativas osteoarticulares en cadera y rodilla, las cuales se apreciaron en todos los casos en su fase inicial. En 34.3% de la muestra se observó la presencia de osteofitosis en vértebras lumbares; en la mayoría se presentó en la fase inicial y en menor proporción la fusión de vértebras. Este tipo de lesiones se desarrollaron por el tipo de actividades que requerían la fuerza de la espalda, por actividad ocupacional y las degeneraciones propias de la edad y sexo. Estos indicadores se presentaron con más frecuencia en individuos mayores de 40 años (19.7% de la población). Se



registró hipoplasia del esmalte en 26.5% de los esqueletos y en 90% de la muestra dientes con caries (Meza 2001).

La autora concluye, a partir de los indicadores señalados, que la mayoría de los individuos tuvieron perturbaciones nutricionales por una ingesta proteica y calórica deficiente, como fue su alimentación rica en carbohidratos y baja en proteínas, propias del maíz y el frijol, que fueron parte fundamental de su alimentación. En suma, la población tenía problemas de nutrición, debido principalmente a la dieta y a la falta de oportunidades de mejorarla; complicación que se agravó por el excesivo trabajo al cual fue sometida al inicio y durante el periodo colonial (Meza 2001).

Se sabe por fuentes etnográficas que los actuales pobladores de Los Olmos llegaron en el año de 1941, provenientes de San Mateo Ixtlahuaca, Estado de México, durante el gobierno del general Lázaro Cárdenas. Hasta 1995, los locatarios sabían que alguna vez había vivido gente en el lugar, porque al trabajar la tierra aparecían huesos humanos, tepalcates, idolitos, malacates y piedras labradas. En ese año, la comunidad contaba con una población aproximada de 800 personas, con acceso a una iglesia, un museo comunitario y un centro de salud. Las tierras de los alrededores de sus viviendas aún se explotan como cultivo de temporal (Sterpone 1995, 1997).

Finalmente, en función de lo dicho en párrafos anteriores, se nota que hay una serie de factores que intervienen en la fisiología del hueso. La controversia en los estudios diagenéticos reside en saber si estos factores, sobre todo los relacionados con la fracción mineral de los huesos, influyen en la cuantificación de elementos químicos de los huesos de origen arqueológico. La respuesta a esta controversia, para la muestra aquí estudiada, es que la población del siglo XVI no tuvo las condiciones de vida adecuadas, para considerar que sus huesos estaban en aceptable estado mineral; sin embargo, esto fue minimizado por medio de la metodología utilizada, al seleccionar únicamente esqueletos correspondientes a individuos adultos “jóvenes” al momento de la muerte. Con este argumento se quedaron fuera de la muestra de estudio los niños y adultos mayores, etapas de la vida en donde las poblaciones son propensas a enfermedades; por ejemplo, los

infantes están expuestos a infecciones gastrointestinales que impiden que el organismo aproveche los minerales provenientes de la dieta; y por otra parte, como se comenta en el capítulo cinco, los huesos de los adultos mayores pierden masa ósea más rápidamente en comparación con las otras etapas de la vida. La osteoporosis es la principal afección de los huesos sobre la cual se debe poner atención al realizar estudios de diagénesis, porque tiene relación directa con la calcificación de los huesos.

Aquí tuve la oportunidad de acceder a un estudio osteológico que me acercó a las condiciones de vida de la población de Tetetzontilco, en el siglo XVI, pero otros análisis diagenéticos que no tengan este tipo de antecedentes pueden considerar la condición química de los huesos en vida con una visión parcial que incluya, dentro de la selección de la muestra, únicamente restos óseos exentos de lesiones patológicas evidentes.

### 3. Ambiente

#### A. Clima

Entre los factores físicos que forman el ambiente, como el clima, la vegetación natural, las formas del relieve y el tipo de suelo, de ellos el primero es el más importante, porque actúa sobre los otros modificándolos. En 1978, Enriqueta García menciona que para Hann, el clima es el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan al estado medio de la atmósfera en un punto de la superficie terrestre; y que para E. López (1922) el clima es el estado más frecuente de la atmósfera en un lugar determinado (García 1973, 1978).

El clima, por consiguiente, afectará todos los procesos involucrados en el desarrollo del relieve, como es la descomposición de las rocas, acumulación de sedimentos, formación de suelos, e influirá en forma determinante en el establecimiento de las comunidades vegetales (ecosistemas). De esta manera, es evidente entonces la importancia que puede tener el clima en el grado de diagénesis de los restos óseos.

Por otra parte, debido a la situación de la República Mexicana con respecto a la zona subtropical de alta presión, y a la orientación general de sus principales sierras, hay en nuestro país, especialmente en su mitad septentrional, amplias regiones con climas áridos clasificados como BW o BS (INEGI 1992f). En esta última clasificación se encuentra la comunidad de Los Olmos. Estos climas están menos expuestos a la influencia de los vientos húmedos del mar. La región de Los Olmos tiene un clima semiárido estepario con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 13 °C. El máximo ocurre en abril y mayo con 19.3 °C y el mínimo en diciembre con 12.8 °C. La precipitación total anual es de 545 mm, con máxima de 120 mm en agosto y mínima en diciembre con 10 mm (INEGI 1992f).

Los meses de enero y diciembre son los más fríos con 13 °C, y con precipitaciones de 15 mm en promedio. Por otro lado, entre los meses de mayo y agosto hay mayor humedad por lluvia, puesto que la precipitación en cada mes está alrededor de los 70 mm. En septiembre, con 50 mm hay un claro decremento en la lluvia, hasta tener 30 mm en noviembre y 10 mm en diciembre.

La fórmula climática para la zona en donde se concentra la comunidad de Los Olmos quedaría de la siguiente manera: BS<sub>1</sub> KW. En donde:

(B) Son climas secos en los que la evaporación excede a la precipitación, por lo que ésta no es suficiente para alimentar corrientes de agua permanentes.

(BS) Se refiere a climas semiáridos o esteparios. Por su localización y por el total de precipitación anual, el clima BS es intermedio entre los climas muy áridos (Bw) y los húmedos (A o C).

(BS<sub>1</sub>) Es el menos seco de los BS.

(K) Su temperatura media anual es menor de 18 °C.

(W) Con régimen de lluvias en verano.

## B. Geomorfología

En tiempos antiquísimos, en el Estado de Hidalgo hubo diferentes eventos geológicos de tipo orogénico, que asociados al vulcanismo y al relleno de cuencas oceánicas, dieron el carácter estructural a esta entidad. El relieve estructural de

las provincias que cubre el estado (provincia de la Sierra Madre Oriental, provincia del eje Neovolcánico y la provincia Llanura Costera del Golfo Norte) fue moldeado por diversos agentes que dieron las características morfológicas que ahora se manifiestan superficialmente.

La continuidad de los fenómenos volcánicos durante casi todo el terciario se manifiesta en el gran espesor y en la extensión que cubren las rocas ígneas del Eje Neovolcánico en la zona sur del estado de Hidalgo, en donde se ubica la comunidad de Los Olmos. La vulcanología dejó domos riolíticos, volcanes compuestos, conos cineríticos enteros y erosionados, mesetas formadas por flujos piroclásticos y derrames de basalto; es decir, los procesos geomorfológicos han modificado el relieve estructural original de las provincias de Hidalgo. A diferentes escalas, los deslizamientos de masas rocosas, provocados por el fracturamiento y la fuerza de gravedad, han derruido los grandes pliegues de fallas de la Sierra Madre Oriental y las estructuras volcánicas de la provincia del Eje Neovolcánico. El agua actúa alrededor de la roca y propicia el desarrollo de aguas residuales. Como agente de disolución, aprovecha los sistemas de fracturas, y forma, en los depósitos de calizas, un conjunto de estructuras típicas de regiones “cársticas”, como son las dolinas, uvales, polijes, cavernas y simas. También ha profundizado grandes cañones transversales a la cordillera, por donde las principales corrientes de la entidad drenan sus aguas al Golfo de México (INEGI 1992 c, d, e).

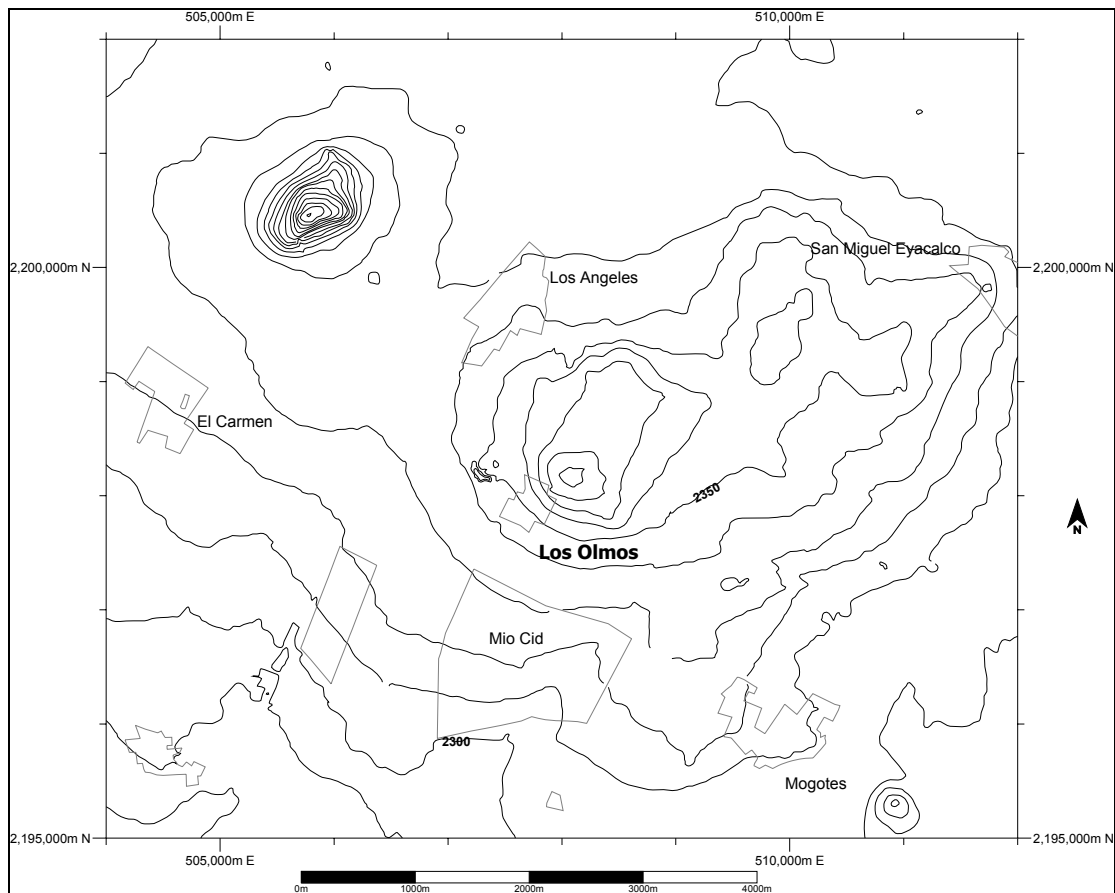
La provincia del eje Neovolcánico cubre también una gran porción del estado, sobre todo el sur, y está constituida predominantemente por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias (brechas, tobas y derrames riolíticos, intermedios y basálticos) de composición y textura variada, las cuales forman en conjunto un extenso y grueso paquete que, en algunas localidades como Pachuca, alcanza varios miles de metros de espesor. Este conjunto fue superpuesto a las rocas sedimentarias mesozoicas por los fenómenos volcánicos. De estas últimas, se encuentran algunos afloramientos que sobresalen en forma de cerros aislados en medio del dominio de las rocas ígneas, como en las localidades de Tula de Allende y en Atotonilco de Tula, donde afloran cerros de caliza (INEGI 1992 c, d, e).

Dentro de la provincia del eje Neovolcánico se encuentra la subprovincia de los lagos y volcanes de Anáhuac. Esta subprovincia está formada por grandes sierras volcánicas o aparatos individuales alternados con amplias llanuras, vasos lacustres en su mayoría. En esta última se encuentra ubicado el poblado de Los Olmos. Esta subprovincia penetra por la parte sur del estado de Hidalgo y ocupa 15.86% (3 314.79 km) de la superficie total de la entidad. Cubre completamente los municipios de Tizayuca, Villa de Tezontepec, Tlanalapan, Tepeapulco, Emiliano Zapata, Apan y Almoloya.

Las rocas volcánicas del Terciario Superior –basaltos, volcánico-clásticas y tobas andesíticas– y los climas –templados subhúmedos y semisecos templados– dieron lugar a la formación, en las zonas planas o con muy poca pendiente, de suelos oscuros, entre los que destaca el Feozem háplico y el Histosol.

En la parte más cercana a los alrededores de Los Olmos se localizan las siguientes elevaciones montañosas: al norte, Santa Rosa, Las Cruces, Las Palomas, Cerro el Rosal, Cerro el Colorado y Cerro la Lechuguilla; todos estas aproximadamente a una altitud de 2 700 msnm; predominando en el lugar suelos de roca extrusiva como basalto y brecha. Es importante señalar que entre esta zona y Los Olmos, sobre una gran planicie (Figura 7), hay sedimentos aluviales donde se desarrollan actualmente suelos a partir de este material. Al sur se localiza el Cerro Verde, Cerro Gordo y La Provincia, a una altitud de 2 550 msnm, y con predominio de materiales geológicos del tipo de la toba y brecha volcánica. A partir de estos materiales se desarrollan los suelos de este lugar. Hacia el lado este, a una altitud de 2 650 msnm se ubica el cerro Los Pitos, la elevación Xoconostle y el Cerro Tlexta. En el centro de esta zona hay materiales geológicos del tipo de la andesita, y hacia los extremos hay rocas del tipo de la arenisca. Finalmente, en la parte oeste de Los Olmos está la elevación montañosa en donde se asienta el volcán Xalpan.

Cabe mencionar que estos materiales tienen características permeables altas, es decir, habilidad para permitir el paso del agua a través de ellos, provocando drenajes activos donde el agua entra y sale con facilidad.



*Figura 7.* Topografía cercana a Los Olmos. La capilla franciscana se asentó en una planicie que forma parte de una pendiente suave que lleva a las planicies aluviales. Esto favoreció la condición química de los esqueletos ya que el agua fluía libremente hacia las partes bajas durante las temporadas de lluvia. Mapa realizado por Gerardo Jiménez, Mapoteca “Jorge A. Vivó”, Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM

### C. Suelos

La comunidad de Los Olmos está asentada en una geología que se caracteriza por tener suelos denominados feozems. Estos suelos se encuentran en varias condiciones climáticas, desde zonas semiáridas hasta templadas o tropicales muy lluviosas, así como en diversos tipos de terrenos, desde planos hasta montañosos. Pueden presentar casi cualquier tipo de vegetación en condiciones naturales. Su

característica principal es una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes (Allison *et al.* 1980).

Los feozems son suelos abundantes en nuestro país, y los usos que se les dan son variados en función del clima, relieve y algunas condiciones del suelo. Muchos feozems profundos y situados en terrenos planos se utilizan para la agricultura de riego o de temporal, de granos, de legumbres y hortalizas; todos con altos rendimientos. Otros menos profundos, o aquellos que se presentan en laderas y pendientes, tienen rendimientos más bajos y se erosionan con mucha facilidad (INEGI 1992 b).

El suelo denominado feozem háplico cubre 57.06% de la región del estado de Hidalgo, y se encuentra distribuido principalmente en el centro y oeste del mismo, cubriendo la zona de Los Olmos. Este suelo se caracteriza por tener un horizonte A Mólico, el cual presenta las propiedades siguientes (Allison *et al.* 1980):

1. La estructura del suelo está lo suficientemente desarrollada como para que no sea masivo y duro, o muy duro en seco.
2. En el caso de partir y moler un terrón de suelo, se observan los siguientes colores: "Chroma" de menos de 3.5 en húmedo; "Value" más oscuro de 3.5 en húmedo y de 5.5 en seco. Este suelo es por lo menos una unidad más oscuro que el horizonte C, tanto en húmedo como en seco. Si solamente se presenta la roca, la comparación de color se hará con el horizonte subyacente inmediato.
3. La saturación con bases es mayor de 50%, por el método de acetato de amonio.
4. Tiene un contenido de materia orgánica mayor de 1% (0.58% de carbón orgánico) en todo su espesor. Si el horizonte superficial oscuro es de menos de 18 cm de espesor, en un suelo virgen y con *solum* de menos de 45 cm, el contenido de materia orgánica deberá ser suficiente para dar un promedio de 1% a una capa arada de 18 cm de espesor. El límite superior del contenido de carbono orgánico del horizonte A Mólico tiene correspondencia con el límite inferior del horizonte A Hístico.

5. El espesor de este horizonte es de más de 10 cm, si sobreyace directamente a la roca. Si el suelo presenta horizontes: B Argílico, Nátrico, Espódico o Cámbico, o Fragipán o Duripán, el espesor del horizonte A deberá ser de un tercio del *solum* si éste es más delgado que 75 cm. El horizonte A deberá tener más de 25 cm, si el espesor del *solum* es mayor que 75 cm.

6. El horizonte Mólico tiene menos de 250 partes por millón de  $P_2 O_5$ , soluble en ácido cítrico; o muestra incremento de  $P_2 O_5$ , soluble en ácido cítrico por abajo del horizonte A. Si no cumple con esta propiedad, se denominará horizonte A Antrópico (Allison *et al.* 1980).

Cerca de Los Olmos también hay suelo denominado Histosol. Son suelos poco abundantes en México, se encuentran en zonas de climas húmedos, ya sean templados o cálidos. También en zonas pantanosas o en los lechos de antiguos lagos (Allison *et al.* 1980). Se caracterizan por tener altas cantidades de materia orgánica en forma de hojarascas, fibras, madera o humus. Su vegetación natural es de pastizal o popal. Se trata de suelos que se desarrollan a partir de basalto, con horizonte H de 40 cm o más, que se extiende de la superficie hacia abajo, o tomado en forma acumulativa en los 80 cm. superiores del suelo. El espesor del horizonte H puede ser menor cuando descansa sobre roca o material fragmentario con contenido de materia orgánica en sus intersticios (Allison *et al.* 1980).

#### D. Vegetación

Los elementos más importantes del clima son la temperatura y la precipitación, así como la humedad y el viento. Los dos primeros son los más decisivos para las plantas, pues son los que hacen cambiar los tipos de vegetación. La humedad del suelo es fundamental para las plantas, la cual depende de la lluvia, de la constitución del suelo y de la temperatura.

La zona cercana a la comunidad de Los Olmos se caracteriza por contener una serie de arbustos espinosos que exigen pocas cantidades de agua para vivir. La presencia de espinas es un carácter bastante generalizado y éstas varían mucho en cuanto a su forma, disposición y significado morfológico. Pueden ser



terminales o laterales con respecto al tallo o a la hoja y a veces hacen presencia también en el fruto. También hay otras variedades de arbustos referidos por Rzedowski (1994), que miden de 0.3 m a 0.8 m de alto y se caracterizan por el tamaño pequeño de sus hojas. Otro más es el de *Quercus opaca*.

En otras partes cercanas hay una cubierta vegetal de matorral de *Opuntia spp* (nopaleras). Esta comunidad se desarrolla preferentemente sobre suelos someros de laderas de cerros de naturaleza volcánica, aunque también desciende a suelos aluviales antiguos (Figura 8).



*Figura 8.* Vegetación en la comunidad de Los Olmos. Predominan arbustos pequeños o plantas con espinas, comunes en regiones semiáridas (matorral crasicaule). Foto: proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico

Estos tipos de vegetación son poco dañinos para la degradación de los entierros porque hay escasez de raíces, las cuales en determinados sitios arqueológicos generan ácidos que destruyen fácilmente los huesos.

En el sur de Hidalgo predominan especies agrupadas en lo que los taxónomos denominan matorral crasicaule. Se trata de plantas arbustivas de clima

árido y semiárido donde las más características son las cactáceas, por ser grandes y de tallo suculento, que juegan un papel de “dominantes fisonómicas”. El tipo de matorral crasicale se extiende por el sur de Hidalgo hasta llegar al valle de México, y se presenta en forma de una comunidad dominada por *Opuntia streptacantha*, *Zaluzania augusta* y *Mimosa biuncífera*, que mide 2 a 3 m de alto, sin contar las eventuales eminencias de *Yucca filifera* y *Schinus molle*. También prospera sobre laderas de roca volcánica, con precipitaciones medias anuales inferiores a 600 mm, e incluye un gran número de componentes herbáceos y subarborescentes (Rzedowski 1994).

Bajo la categoría de “matorral micrófilo”, y en zonas áridas ubicadas sobre la altiplanicie que se extiende hasta Hidalgo, se encuentra el matorral de *Larrea tridentada* y *Flourensia cernua*, que también se desarrolla preferentemente sobre llanuras y partes bajas de abanicos aluviales. *Larrea* a menudo es la única dominante. Junto con *Flourensia* forma 80 a 100% de la vegetación. Los matorrales de *Flourensia* son menos frecuentes y se han observado cerca de Actopan, al sur de Los Olmos. El matorral micrófilo (arbustos con hojas pequeñas) es de los más tolerantes a condiciones de deficiencia de drenaje y de cierta salinidad del suelo. El matorral de *Fouquieria splendens* también es espinoso y se presenta principalmente en la parte occidental de la Altiplanicie. Este matorral reaparece en la región árida de Hidalgo (Rzedowski 1994, INEGI 1992a).

Además, hay pequeños manchones de matorral de *Quercus*, que cubren extensamente la superficie. Se trata de comunidades arbustivas densas, generalmente más o menos caducifolias; prosperan sobre suelos someros y pedregosos de laderas de los cerros. Son encinares arbustivos que se desarrollan en áreas climáticamente intermedias entre los matorrales propios de clima francamente árido y los bosques de clima semihúmedo. En las áreas limítrofes de clima BS y CW de la clasificación de Köppen, es frecuente que haya entre 400 y 750 mm de precipitación media anual; generalmente miden alrededor de un metro de alto. Las hojas de las especies dominantes son duras y generalmente pequeñas (Figura 9).



*Figura 9.* Se aprecia la vegetación al sur de la comunidad de Los Olmos. El poblado se localiza en la parte superior derecha de la imagen, en pie de monte. Las condiciones secas del lugar evitan el desarrollo considerable de plantas y en consecuencia hay escasez de raíces que no perjudican químicamente a los esqueletos. Foto: proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico

## Capítulo V. Desarrollo analítico: restos óseos

---

### 1. Excavación

Esta investigación forma parte del proyecto arqueológico “Geografía Histórica: investigación acerca del urbanismo, demografía y medioambiente en el norte de la cuenca de México y regiones periféricas”, dirigido por el arqueólogo Osvaldo Sterpone, investigador del Centro INAH-Hidalgo. El trabajo específico para la excavación de los entierros fue realizado en dos etapas; la primera, supervisada por la antropóloga Margarita Meza en el año 1998; y la segunda, a cargo de Jorge A. Talavera en el año 2000.

Con el antecedente arqueológico de la zona de Hidalgo, proporcionado por el arqueólogo Osvaldo Sterpone, se sabía que en la actual comunidad de Los Olmos había osamentas asociadas con una capilla franciscana del siglo XVI, todas ellas con un patrón de enterramiento particular, indicando que los cadáveres fueron depositados de forma planeada y con características funerarias similares.

El trabajo de prospección se realizó en un área de 1000 m<sup>2</sup> (Figura 10). Es un lugar escasamente poblado, por lo que prácticamente no hay construcciones habitacionales que hubieran interferido en la excavación. Topográficamente, se trata de un sitio ubicado en una planicie. Dentro de esta extensa zona se realizaron las unidades de excavación (Figuras 11, 12 y 13). Se excavaron tres pozos en el atrio de 2 m<sup>2</sup> cada uno y, conforme se encontraron restos óseos, fue necesario aumentar las dimensiones de la excavación. En la capilla se trabajó a partir de fosas independientes (Figura 11).



*Figura 10.* Zona de excavación correspondiente al atrio de la capilla. Foto: Proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico



*Figura 11.* Excavación en la zona del interior de la capilla. La barda de la derecha corresponde al patio de la escuela primaria del poblado. Foto: Proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico



*Figura 12.* En esta imagen se distingue parte de los cimientos de la capilla. Del lado derecho se aprecia la excavación de un entierro individual. Foto: Proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico



*Figura 13.* Área de excavación correspondiente al atrio. Foto: Proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico

Los registros de excavación se hicieron por niveles arbitrarios y a partir de estratos naturales. Los esqueletos enterrados en el interior de la capilla fueron retirados después de quitar el piso de estuco, una capa de grava y el suelo correspondiente (Figura 14). En el atrio se excavó el suelo directamente. En todos los casos los entierros se hallaron entre 60 y 80 cm de profundidad. Se utilizaron las técnicas antropofísicas universales de registro; retícula para controlar la zona de excavación, se retiró el suelo de cada una de las capas arbitrarias de 10 cm; al encontrar esqueleto se limpió el exceso de suelo, se dibujó y se fotografió, posteriormente se hizo el levantamiento y el almacenaje para su posterior análisis en laboratorio.



*Figura 14.* Las osamentas excavadas en el atrio y en el interior de la capilla poseían un mismo patrón de enterramiento. En esta imagen se muestra un esqueleto en posición cristiana con los brazos cruzados sobre el pecho. Foto: Proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico

## 2. Muestra ósea

La selección de las muestras óseas se hizo de acuerdo con el siguiente criterio y considerando los esqueletos excavados en las temporadas de 1998 y 2000.

- Se utilizaron los esqueletos más completos que tenían aproximadamente 80% de sus componentes óseos. En la mayoría de los entierros se obtuvieron en buen estado el cráneo, las vértebras, las costillas, los huesos largos, la pelvis y las

falanges de manos y pies. Esto fue un buen indicio de las aceptables condiciones físicas de los esqueletos. Debido a los objetivos del presente trabajo, no fue necesario hacer el examen osteométrico para saber si en la muestra de estudio había esqueletos correspondientes a individuos de origen español, aunque se sabe que de 300 esqueletos excavados en el mismo sitio pueden haber 2 que corresponderían a individuos españoles. En este sentido se puede consultar el trabajo de Flores B. (2005) quien hace la caracterización física y social de los pobladores de Tetetzontilco.

- La edad de las osamentas fue determinada por técnicas morfológicas para seleccionar únicamente entierros de individuos adultos jóvenes (de 20 a 30 años, aproximadamente) sin importar la etapa exacta en este rango (Ubelaker 1989, Loth e Iscan 1989, Meindl y Lovejoy 1989). Se observaron los centros de osificación secundarios en los huesos largos, para asegurar que se presentaban cierres epifisarios.

La elección de esqueletos adultos jóvenes se debió a que son etapas ontogenéticas en donde los elementos inorgánicos constituyentes de los huesos son constantes en comparación con otros periodos de la vida. Inclusive, hay estudios que indican que la densidad del tejido óseo es menos variable alrededor de los 25 años de edad (Figura 15). La densidad y porosidad ósea, son parámetros necesarios de estudiar en la diagénesis de los huesos, normalmente se estabilizan durante la edad adulta joven (Willey *et al.* 1997). La densidad ósea es el indicador inicial que da información acerca de los intercambios entre la química del suelo y la química del hueso.

En este estudio no se tomaron en cuenta los huesos de personas de edad avanzada ni los huesos de infantes, porque tienen un mayor contenido de tejido óseo de baja densidad que los huesos de los adultos jóvenes. Quedaron disponibles sólo las osamentas que tuvieran su correspondiente muestra de suelo.

- También se consideró que todos los esqueletos hayan estado enterrados en la misma profundidad.



- No se utilizaron esqueletos con evidencias claras de patologías.
- Se usaron únicamente fémures, porque en éstos ya hay parámetros de comparación con respecto a estudios químicos y físicos enfocados a la degradación ósea (Gómez 2000), a diagénesis y a paleodieta (Galloway *et al.* 1997).

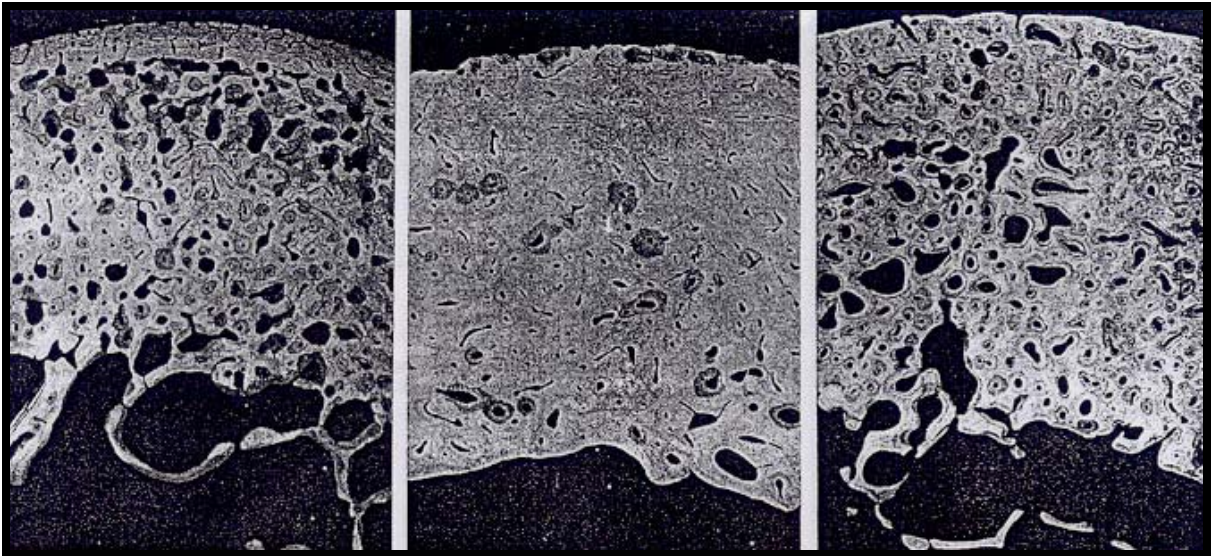


Figura 15. Microrradiografías, obtenidas por Jennifer Jowsey, de cortes no descalcificados de la diáfisis femoral de personas de diversas edades.<sup>1</sup> (Ham 1970)

- De los fémures se obtuvieron fragmentos de la sección media de la diáfisis, de 2.5 cm de largo por 1.5 cm de ancho y 5 mm de espesor (Figura 16), principalmente porque se trata de una zona en donde predomina el tejido compacto. Algunos antecedentes indican que hay diferencias de contaminación de acuerdo con el tipo de tejido (Price *et al.* 1992).

<sup>1</sup> Izquierda: corte del fémur de un niño de siete años de edad; indica el recambio rápido con muchos túneles de resorción y muchos sistemas de Havers de nueva formación. Centro: corte del fémur de una persona de 25 años de edad, hay pocos indicios del recambio de los sistemas porque no se observan túneles de resorción; la mayor parte de los sistemas están bien calcificados y tienen densidad uniforme. Derecha: corte del fémur de una persona de 85 años de edad. Hay muchos túneles de resorción. Las capas nuevas de hueso que están empezando a llenar algunos túneles que presentan poca calcificación.



*Figura 16.* Sección de los fémures utilizada para el estudio

Del fragmento de hueso se obtuvo una lámina transversal delgada utilizando un disco de diamante (Figura 17).



*Figura 17.* Disco de diamante que se utilizó para obtener una lámina delgada de hueso. Foto proporcionada por el Dr. Jesús Arenas, Instituto de Física, UNAM

Se emplearon guantes de látex para no contaminar cada una de las muestras. Después de obtener el fragmento de hueso, se depositó en recipientes de plástico.

En el estudio diagenético y en la evaluación de dietas antiguas se utilizan mayoritariamente huesos largos. Hay dos razones relevantes: primero, que dichos huesos son los más representativos en las investigaciones antropológicas para hacer comparaciones; y segundo, porque se trata de huesos que con frecuencia resisten más las condiciones desfavorables del suelo durante el tiempo de enterramiento, debido a su tamaño, morfología y diámetro cortical.

- También fue necesario tener huesos modernos para cotejar los resultados. La comparación de atributos físicos y químicos de huesos modernos inalterados, con aquéllos provenientes de muestras arqueológicas, ha resultado en una variedad de pruebas sobre la alteración diagenética. Las caracterizaciones físicas incluyen el examen estructural microscópico y la caracterización de la cristalinidad del mineral del hueso (White y Hannus 1983). “Los análisis cuantitativos incluyen la determinación de la proporción de mineral en la materia orgánica, la medición de las proporciones de calcio y fósforo, y los análisis de elementos que son comunes en los medio ambientes diagenéticos pero ausentes en el hueso inalterado” (Price *et al.* 1992: 518). Con este objetivo, se usaron como muestra control restos óseos de dos individuos del sexo femenino que tenían aproximadamente nueve años de haber fallecido. Su procedencia se registra para Toluca, Estado de México. Los esqueletos permanecieron exentos de procesos sedimentarios después de su muerte, únicamente bajo condiciones ambientales que favorecieron los procesos biológicos que provocaron la pérdida total del tejido blando. Por medio de las técnicas antropofísicas, sus edades se calcularon entre 25 y 30 años al momento de su muerte. También se utilizó únicamente diáfisis de fémur, como en el caso de las muestras arqueológicas.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, la muestra ósea de estudio quedó reducida e integrada de la siguiente manera: se utilizaron un total de 30 entierros y en de cada uno de éstos se obtuvo un fragmento de diáfisis de fémur, como se mostró en la Figura 16. La muestra *A* integró 13 fragmentos de fémur de diferentes entierros, la muestra *B* consistió de 15 fragmentos y la muestra *2R* incluyó dos muestras correspondientes a esqueletos modernos. La letra *X* en el cuadro se refiere a los huesos exentos de procesos de enterramiento (Cuadro 4).

*Cuadro 4*

Muestras de fémures utilizadas para los análisis de porosidad y densidad. Se registró el sexo de los entierros, aunque no es una variable que se considerara para el presente estudio

Muestra	Pozo	Entierro	Hueso	Sexo	Edad	Lugar
1 A	2	1	fémur	femenino	20 – 24	atrio
3 A	2	2	fémur	masculino	25 – 29	atrio
7 A	1	7	fémur	femenino	20 – 24	atrio
12 A	1	6	fémur	femenino	30 – 34	atrio
14 A	1	1	fémur	femenino	25 – 29	atrio
20 A	3	2	fémur	femenino	20 – 24	atrio
22 A	3	3	fémur	femenino	25 – 29	atrio
25 A	3	4	fémur	femenino	25 – 29	atrio
30 A	3	5	fémur	femenino	25 – 29	atrio
35 A	4	7	fémur	masculino	30 – 34	capilla
39 A	4	10/2	fémur	masculino	20 – 24	capilla
44 A	4	10/1	fémur	femenino	25 – 29	capilla
51 A	4	14	fémur	masculino	30 – 34	capilla
1 B	W 46 S1	23	fémur	femenino	30 – 34	atrio
2 B	W 40 38 S1	10	fémur	masculino	30 – 34	atrio
3 B	W 46 S2	42	fémur	masculino	30 – 34	atrio
4 B	W 45 S3	28	fémur	masculino	40 – 44	atrio
5 B	W 40 S1	41	fémur	femenino	25 – 29	atrio
6 B	W 52 S8	1	fémur	masculino	40 – 44	atrio
7 B	W 52 S8	3 A	fémur	femenino	30 – 34	atrio
8 B	W 59 S11	39	fémur	masculino	30 – 34	atrio
9 B	W 60 S1	1	fémur	femenino	30 – 34	atrio
10 B	W 40 S8	17	fémur	femenino	20 – 24	atrio
11 B	Capilla	FOSA 4	fémur	masculino	30 - 34	capilla
12 B	W 60 S1	13	fémur	masculino	30 – 34	atrio
13 B	Capilla	FOSA 9	fémur	masculino	40 – 44	capilla
14 B	W 46 S1	22	fémur	femenino	25 - 29	atrio
15 B	W 52 S S8	21	fémur	masculino	25 – 29	atrio
54 A (2R)	X	X	fémur	femenino	25 – 29	moderno
55 A (2R)	X	X	fémur	femenino	25 – 29	moderno

### 3. Pruebas físicas

#### A. Porosidad ósea

Por medio de esta técnica se puede conocer cuantitativamente el estado mineral del hueso, determinante en la conformación de su estructura. La porosidad es el paso inicial en el entendimiento de los estudios diagenéticos de huesos humanos, porque dependiendo de los niveles de porosidad serán los grados de diagénesis.

La prueba consistió en obtener el porcentaje de agua que absorbe el fragmento de hueso por medio del siguiente método:

- a) Se depositó el hueso en un vaso de precipitados limpio de 100 ml y se introdujo en una estufa a 60 °C durante 24 horas para extraerle su humedad y la del ambiente.
- b) Se pesó en una balanza analítica.
- c) Se agregó al vaso agua destilada hasta la marca de 40 ml.
- d) Se sometió a calentamiento durante 30 minutos a 60 °C en una parrilla eléctrica.
- e) Se quitó el vaso de la parrilla y se enfrió a temperatura ambiente.
- f) Se pesó el hueso en la balanza analítica. Se sacudió únicamente para quitarle el exceso de agua hasta que se notó una película blanquecina que indicó que ya no escurría.
- g) Se regresó la muestra al agua para que estuviera lista para el siguiente análisis.
- h) Finalmente, se realizaron los cálculos correspondientes a la fórmula siguiente (unidades porcentuales):

$$\text{Porosidad} = \frac{\text{peso hueso húmedo} - \text{peso hueso seco}}{\text{peso muestra seca}} \times 100$$

Unidades = %

## B. Densidad ósea

La densidad ósea también es una propiedad necesaria para determinar el estado mineral de los huesos. Las diferencias en la densidad de huesos exhumados se deben a la pérdida de elementos o por adición de minerales del entorno inmediato al del entierro. Para este estudio la densidad mineral del hueso es definida como la densidad física de los minerales que hacen resistente al hueso (Farquharson y Speller 1997).

Método:

- a) Del análisis de porosidad, la muestra de hueso húmedo se colocó en un picnómetro de 25 ml (matraz volumétrico de 25 ml con una boca de 2.5 cm con tapón esmerilado y perforación de salida de aire).
- b) El picnómetro se llenó de agua destilada, se tapó, se secó perfectamente y se obtuvo su peso con el agua y la muestra de hueso.
- c) Se regresó la muestra al vaso sin agua y se llevó a la estufa para secarla a 60 °C por lo menos 24 hrs. Una vez seca, se guardó en la cápsula de plástico correspondiente. Se lavó perfectamente el picnómetro y se pesó lleno de agua con su tapón.
- d) Se tiró el agua del picnómetro, se secó bien y se volvió a pesar.
- e) Se realizaron los cálculos correspondientes a la fórmula siguiente (en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ ).

$$\text{Densidad} = \frac{C - A}{[(C - A) + (B - A)] - (D - A)}$$

Donde: A = peso del picnómetro.

B = peso del picnómetro + agua

C = peso del picnómetro + hueso

D = peso del picnómetro + hueso + agua

#### 4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

“El microscopio es un instrumento que nos permite observar en una muestra detalles cuyas dimensiones son menores al límite de resolución del ojo humano” (Díaz y Arenas 2003: 19). Por otra parte,

“[...] el microscopio electrónico de barrido (SEM, de sus iniciales en inglés “*Scanning Electron Microscope*”) por su capacidad para proporcionar información morfológica, topográfica, química, cristalográfica, eléctrica y magnética de muestras másicas, ha contribuido considerablemente al dominio de la física del estado sólido, de la ciencia de los materiales, de la electrónica, de los polímeros, de los textiles, de la biología, medicina, etc.” (Díaz y Arenas 2003: 18).

La microscopía electrónica, que nació hace unas décadas, es un método de análisis completamente establecido, una de las herramientas más usadas en la caracterización de las propiedades estructurales de los materiales que se ha constituido como un medio indispensable para el estudio detallado de la naturaleza física y composición química de los sólidos a escala atómica y molecular, por medio del barrido que obtiene información de la superficie de la muestra (Yacamán y Reyes 1995).

El microscopio electrónico utiliza un haz monoenergético de electrones para realizar un barrido de la superficie de la muestra de estudio, cuando el haz interacciona con el material se generan diferentes señales que se colectan para formar una imagen de la superficie de estudio.

“En la imagen de barrido cada punto es presentado en forma serial en el cual varios cientos de puntos correspondientes al objeto son desplegados consecutivamente. El proceso es repetido a una frecuencia tan elevada, que la imagen del objeto aparece como en una sola a nuestros ojos” (Díaz y Arenas 2003: 19)

Este microscopio dispone de varios sistemas de detección que le permiten diferenciar entre la señal producida por los electrones secundarios y la generada por los electrones retrodispersados; con los primeros se puede obtener una

imagen de apariencia tridimensional de la muestra, mientras que con los segundos se obtiene una imagen que revela diferencias en la composición química por diferencias de contraste, además de apariencia tridimensional debida a la profundidad de foco de un microscopio electrónico de barrido (MEB) que es superior a los de un microscopio óptico. Esta propiedad sirve para la realización de análisis químicos cualitativos y cuantitativos a escala micrométrica de muestras sólidas.

“Las partes fundamentales que componen el diseño de un microscopio electrónico son en general las mismas que aquellas presentes en un microscopio óptico, ambos incluyen lentes condensadoras, objetivas, intermedias y proyectoras. La diferencia radica en sistema de iluminación, el primero utiliza *electrones* mientras que el segundo utiliza luz” (Díaz y Arenas 2003:19 - 20).

El MEB está constituido por un cañón de electrones que contiene una fuente de electrones conformada por un filamento de tungsteno capaz de emitir energías ajustables desde unos cientos de eV hasta unas decenas de keV (50 KeV) cuando es calentado. En su estructura hay alineadas un conjunto de tres lentes condensadoras electromagnéticas; las dos primeras aceleran y reducen el haz a un diámetro aproximado de 10 a 50 angstroms, mientras que la tercera (también llamada lente objetivo) enfoca el haz explorador (Díaz 2003). Un sistema de bobinas es el encargado de barrer el haz primario sobre la superficie de la muestra a lo largo de los ejes X y Y. Los rayos X característicos generados en la muestra son detectados por espectrómetros dispersores de energía (EDS) (más adelante se detalla esta técnica) (Díaz 2003).

La base de la columna del microscopio contiene la cámara donde se localiza el soporte de la muestra, el cual es capaz de sujetar muestras de varios centímetros, moverse en las direcciones X, Y, Z; rotarla e inclinarla a 360° y 90°, respectivamente. Como consecuencia, las muestras se pueden observar desde casi cualquier perspectiva (Díaz 2003).



“El microscopio electrónico de barrido (SEM) presenta más ventajas que el microscopio óptico debido a la utilización de un mayor número de señales que provienen de la interacción de los electrones con la muestra y que proveen información sobre la topografía, la orientación cristalina, la composición química, y el potencial eléctrico del material en observación” (Díaz y Arenas 2003: 40).

Otra ventaja es su poder de resolución de hasta 3 nm, lo que le permite la observación de los detalles cristalográficos del hueso. “El proceso de formación de imagen en el microscopio electrónico de barrido es único y no tiene analogía con la formación de imagen en un microscopio óptico o en un microscopio electrónico de transmisión; la imagen es generada en forma secuencial durante un barrido” (Díaz y Arenas 2003: 49). El SEM tiene, además, una amplia profundidad de campo.

#### Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío

En los últimos años, como una necesidad de estudiar muestras no conductoras e incluso húmedas, se desarrolló una nueva modalidad de microscopios electrónicos de barrido denominada “microscopio electrónico de barrido de presión controlada o de bajo vacío” (Figura 18). En esta modalidad, la cámara de la muestra se deja con cierta cantidad de gas, el cual se ioniza adquiriendo una carga positiva; con esto se eliminan electrones estacionados en la superficie eliminando la acumulación de carga en el material observado; mientras menos conductor sea el material, se requiere mayor presión en la cámara. Sin embargo, a mayor presión existe mayor dispersión del haz incidente, por ello, las condiciones de trabajo deben ser especiales y diferentes para la caracterización de los distintos materiales (Díaz 2003).



*Figura 18.* Se utilizó un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío marca JEOL JSM-5600LV. Foto proporcionada por el Dr. Jesús Arenas, Instituto de Física, UNAM

Al respecto, Díaz y Arenas (2003: 40) comentan que: “[...] una de las ventajas de la utilización de microscopía electrónica es que ofrece la posibilidad de trabajar a presión controlada lo cual facilita la observación de muestras húmedas”.

Por medio de las técnicas de microscopía electrónica se pueden hacer estudios en diversos tipos de materiales arqueológicos: lítica, metales, huesos y dientes y cerámicas y vidrios, entre otros. El hueso de origen arqueológico tiene alteraciones que pueden ser estudiadas, ya que es un material en el que se llevan a cabo complejos procesos de difusión de Ca y otros elementos. Claramente, los análisis histomorfológicos utilizando imágenes microscópicas pueden mostrar la alteración diagenética.

Método:

Del fragmento de 2 cm de hueso que se utilizó para las técnicas de porosidad y densidad, se hizo un corte transversal de aproximadamente 3 mm de espesor, incluyendo en él la zona externa, media e interna de la diáfisis. Esta última sección del hueso se colocó en un porta muestras para analizarlo en el microscopio electrónico de barrido de bajo vacío. Simultáneamente, se hicieron los análisis de espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS) que a continuación se describe. Ambas técnicas se aplicaron en 14 muestras de fémures (Cuadro 5).

## 5. Espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS)

La espectroscopía por dispersión de energía de rayos X es una técnica de microanálisis químico que se desarrolla conjuntamente con la microscopía electrónica de barrido. La técnica utiliza los rayos X emitidos por la muestra durante el bombardeo por el *haz* de electrones para determinar la composición elemental del volumen analizado (Díaz 2003).

Cuando la muestra es bombardeada por el haz primario, los átomos que comprenden la superficie de la muestra expulsan electrones; la vacancia de electrones resultante se llena entonces con electrones de la capa superior del átomo y es entonces cuando se emite un rayo X para balancear las diferencias de energía entre los dos electrones (Díaz 2003).

El detector EDS mide el número de rayos X emitidos contra su energía. La energía de los rayos X es característica del elemento que lo emite, de esta manera es posible obtener un espectro de la energía contra el conteo relativo del detector el cual se evalúa para las determinaciones cualitativas y cuantitativas de los elementos presentes en el área analizada (Díaz 2003).

Normalmente se obtiene un análisis cualitativo de los constituyentes mayoritarios y minoritarios de pequeñas áreas. Sin embargo, en muestras planas y bien pulidas, como sucede con el hueso, es posible hacer análisis cuantitativos, al comparar la intensidad de los rayos X a cualquier longitud de onda con la

producida en una muestra estándar (patrón) de composición conocida (Díaz 2003).

“En los estudios diagenéticos, si los patrones de concentraciones elementales están dentro de las expectativas, los niveles elementales son asumidos como reflejo del consumo dietario; si las concentraciones no están dentro de los rangos esperados, se considera que aquellos elementos están alterados diagenéticamente” (Greenlee 1996: 336).

## 6. Difracción de rayos X

La difracción de rayos X es una técnica analítica no destructiva usada para identificar y caracterizar materiales cristalinos. Los rayos X se definen como una radiación electromagnética de longitud de onda corta producida por la desaceleración de electrones de elevada energía o por transiciones electrónicas que implican electrones orbitales internos de los átomos (Díaz 2003).

Los rayos X son radiación electromagnética de longitud de onda corta cuyo intervalo de longitudes de onda va desde aproximadamente 0.1 Å hasta alrededor de los 100 Å; sin embargo, en difracción sólo se utiliza el intervalo de 0.1 a 2.5 Å. En el espectro electromagnético se les encuentra entre la radiación ultravioleta y los rayos gamma (Díaz 2003).

Su descubrimiento en 1895 permitió a los científicos investigar la estructura cristalina a nivel atómico, estableciendo que cada sólido cristalino tiene un patrón de difracción característico que puede usarse como un indicador para su identificación. Al igual que con otros tipos de radiación, la interacción entre la radiación X y los electrones de la materia por la que pasa da lugar a una dispersión. Cuando los rayos X alcanzan la superficie de un cristal o cualquier ángulo ( $\theta$ ), una porción es dispersada por la capa de átomos de la superficie, y la otra porción no dispersada penetra en la segunda capa de átomos donde otra vez una fracción es dispersada y la restante pasa a la tercera capa.

Cuando los rayos X son dispersados por el entorno ordenado de un cristal, tienen lugar interferencias (tanto constructivas como destructivas) entre los rayos

dispersados, ya que las distancias entre los centros de dispersión son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la radiación. El resultado es la difracción (Díaz 2003).

Método:

El fragmento de hueso utilizado para el análisis por medio de microscopía electrónica de barrido de bajo vacío se ingresó a la cámara de análisis de difracción de rayos X. Esta técnica se utilizó únicamente para apoyar los análisis anteriores y tener un parámetro de comparación del tamaño de cristal de hidroxiapatita para muestras arqueológicas y la contemporánea. Por este motivo, únicamente se analizaron tres muestras de fémures correspondientes a tres individuos, dos de origen arqueológico y uno de origen contemporáneo, este último exento de procesos de enterramiento (Cuadro 5).

## 7. Procedimiento estadístico

Para comparar los datos entre grupos, primero se hizo un análisis exploratorio para los datos obtenidos de todas las pruebas analíticas con el objetivo de tener un panorama general de la información. Utilizamos el programa computacional SYSTAT versiones 10 y 11. Se obtuvieron algunas medidas descriptivas de cada variable como el tamaño del grupo, la media, la mediana, la desviación estándar, los valores mínimos y máximos. Se hicieron comparaciones entre los grupos por medio de diagramas de caja. Para el caso de la porosidad y densidad se hizo un análisis de varianza no paramétrico o prueba de Kruskal–Wallis, seguido de la prueba de suma de rangos de Wilcoxon-Mann-Whitney para comparaciones por pares; para esta última definimos  $\alpha = 0.12$ , por lo que el nivel de significación en cada comparación fue  $\alpha/3 = 0.04$ . Para las comparaciones entre elementos químicos de acuerdo con el sitio de enterramiento y la sección del hueso sólo se hicieron las pruebas Kruskal-Wallis (Márquez de Cantú 1991: 507).

### Cuadro 5

Muestra de restos óseos utilizados para el estudio de microscopía electrónica de barrido de bajo vacío (SEM), y de espectroscopía por dispersión de energía de rayos (EDS). A las muestras 13B, 15B y 2R se les aplicó difracción de rayos X (XRD). Los datos de edad y sexo de los esqueletos fueron corroborados con los obtenidos por las antropólogas físicas Margarita Meza M. y Bertha A. Flores Hernández

No. Muestra	Entierro	Enterramiento	Hueso	Edad (años)	Sexo
15 B	21	atrio	fémur	25 – 29	masculino
12 B	13	atrio	fémur	30 – 34	masculino
13 B	f 9	capilla	fémur	40 – 44	masculino
4 B	28	atrio	fémur	40 – 44	masculino
2 B	10	atrio	fémur	30 – 34	masculino
7 B	39	atrio	fémur	30 – 34	femenino
3 A	2	atrio	fémur	25 – 29	masculino
35 A	7	capilla	fémur	30 – 34	masculino
51 A	14	capilla	fémur	30 – 34	masculino
22 A	3	atrio	fémur	25 – 29	femenino
1 A	1	atrio	fémur	20 – 24	femenino
44 A	10/ IND 1	capilla	fémur	25 – 29	femenino
30 A	5	atrio	fémur	25 – 29	femenino
2R	Moderno	NO	fémur	25 – 29	femenino

## Capítulo VI. Desarrollo analítico: suelo

---

### 1. Muestreo

Los antecedentes arqueológicos de la comunidad de Los Olmos, en cuanto a la presencia de osamentas, permitieron obtener las muestras de suelo de forma metódica y desde el inicio de la excavación.

Para muestrear el suelo se hizo una limpieza de la superficie de cada nivel arbitrario con una brocha, con el objetivo de eliminar los posibles residuos de grava de la capa anterior o de otros materiales ajenos al contexto de enterramiento. Se realizó una perforación en el centro del cuadrante de diez centímetros de profundidad y de 30 centímetros de diámetro; se retiró aproximadamente 1 Kg de suelo y se guardó en recipientes plásticos. Se continuó excavando el estrato, aplicando el mismo método en cada uno de los niveles. Para evitar contaminación de las diferentes capas, se lavaron con agua destilada los instrumentos de plástico que se utilizaron para remover el suelo. Se obtuvieron muestras de suelo en todo el perfil, inclusive por debajo del esqueleto.

En la excavación del interior de la capilla se retiró el piso de estuco de aproximadamente 5 cm de espesor que estaba cubriendo toda la tumba; después se repitió el procedimiento con una capa de grava que ocupaba un espacio de 5 cm. Posteriormente se obtuvieron muestras de suelo por niveles métricos de 10 cm cada uno hasta el contacto con los esqueletos. Para las excavaciones del atrio se requirió de una estrategia diferente a la utilizada en la capilla, porque se trataba de condiciones de enterramiento diferentes. Por la carencia de vegetación, después de una limpieza ligera de la superficie se comenzó la excavación registrando muestras de suelo también por cada 10 cm (Figuras 19 y 20).



*Figura 19.* Zona de excavación en un costado del atrio. Las condiciones secas del suelo favorecieron la obtención de las muestras desde la superficie hasta el contacto con los esqueletos.  
Foto: Proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico



*Figura 20.* Perfil de un pozo del atrio que muestra escasez de raíces y de humedad. Esto favoreció la preservación del tejido óseo. Foto: Proyecto Geografía Histórica, archivo gráfico



Los esqueletos estaban enterrados entre 60 y 80 cm de profundidad. En todos los casos se obtuvo una muestra de suelo adicional que estaba en contacto directo con los esqueletos, concretamente en la zona de los fémures. La mayoría de las muestras se extrajeron en condiciones de humedad escasa. A causa de la resequead del suelo no fue necesario secar cada una de las muestras y únicamente se guardaron para su posterior análisis de laboratorio. Se excavaron cuatro pozos, tres en el atrio y uno que correspondía a las tumbas de la capilla. En total se obtuvieron 31 muestras de suelo (Cuadro 6). En los pozos del atrio se inició la excavación en un área de 2 m<sup>2</sup> cada uno y, conforme se fueron encontrando esqueletos, fue necesario ampliar la zona de excavación. Por la cantidad de entierros localizados, en dos de estos pozos se extendió la excavación, como se muestra en las figuras del capítulo 5. El pozo registrado como “capilla” se refiere a seis fosas donde se encontraron enterramientos individuales.

*Cuadro 6*

Muestras de suelo obtenidas en las excavaciones de la comunidad de Los Olmos, Hidalgo. Proviene del atrio y del interior de la capilla

Zona de excavación	No. muestra	Profundidad (cm)	Observaciones
Pozos 1, 2, 3 Atrio	1	de 0 a 10	
	2	de 10 a 20	
	3	de 20 a 30	
	4	de 30 a 40	
	5	de 40 a 50	
	6	de 50 a 60	
	7	de 60 a 70	Contacto con el esqueleto
	8	de 70 a 80	
Pozo 4 Interior de la capilla	1	de 0 a 10	
	2	de 10 a 20	
	3	de 20 a 30	
	4	de 30 a 40	
	5	de 40 a 50	
	6	de 50 a 60	Contacto con el esqueleto
	7	de 60 a 70	

## 2. Preparación de la muestra

Como el agua en el contexto de enterramiento favorece reacciones químicas, la humedad contenida en cada una de las muestras de suelo fue extraída durante 24 horas en una estufa a 60 °C. El suelo seco se pasó por un tamiz de abertura de malla de 2 mm de diámetro, en donde únicamente pasaron las partículas del tamaño de limos, arcillas y arenas, recordando que estas partículas son las que intervienen de manera más relevante en la diagénesis del hueso. Finalmente, se guardaron en recipientes de plástico para el inicio de los análisis físicos y químicos.

### Propiedades que intervienen en la alteración del hueso

La diagénesis de un hueso enterrado puede darse tanto por procesos químicos como por procesos físicos. El intemperismo provoca las etapas iniciales de la diagénesis superficial del hueso. El más activo es el intemperismo químico, y es consecuencia del agua, de las condiciones físicas del suelo para que el agua penetre a éste y de que el suelo tenga las características químicas necesarias para acelerar o retardar esa interacción.

Los enterramientos expuestos a climas secos tienen poca reacción química con su entorno inmediato, porque la falta de humedad por largos periodos evita las reacciones químicas en el interior de los estratos del suelo; por el contrario, los climas húmedos favorecen la diagénesis. Esto puede suceder en zonas tropicales como consecuencia de las lluvias constantes y a las temperaturas altas. Esto hace que los elementos o compuestos del suelo se pongan en solución y durante las estaciones secas dichos compuestos puedan precipitarse en la estructura del hueso.

La cantidad de lluvia es un factor determinante para conocer más de la degradación del hueso, porque tiene relación con el drenaje interno y superficial que hay en los contextos de enterramiento. Hay características del suelo que permiten un buen drenaje interno y existen condiciones geomorfológicas, de la

posición de las tumbas en la geoforma, asociadas con las cantidades de agua a que están expuestas éstas. El drenaje superficial está determinado, además de las características del suelo, por la densidad de la vegetación. El drenaje interno promueve una destrucción química, porque las sustancias del suelo necesitan estar en solución para reaccionar. En este sentido, los grados de diagénesis dependen de la permeabilidad del suelo, del drenaje y de la humedad del lugar de enterramiento.

Por esta causa fue necesario evaluar algunas cualidades del suelo, con el propósito de conocer la dinámica de su drenaje interno. En este caso se analizó la densidad aparente, la densidad real y la porosidad del entorno del entierro. También se requirió evaluar las condiciones químicas que intervienen en los intercambios químicos del hueso con la química del suelo. El pH, para entender qué reacciones químicas pueden haber y cuáles no, es decir, qué elementos están activos y cuáles no; la materia orgánica, para saber cuántos ácidos húmicos hay y cómo aportan acidez al suelo; la conductividad eléctrica, para notar la existencia o no de sales totales y el tipo de éstas y, finalmente, la capacidad de intercambio catiónico total, que indica características relacionadas con la capacidad que tiene el suelo de adsorber cationes.

### 3. Análisis físicos

#### A. Densidad aparente

De la composición física de los suelos, la densidad aparente es una propiedad que indica el volumen que ocupan las partículas sólidas, incluyendo el espacio poroso que hay entre éstas dentro del suelo. Por medio de esta característica sabemos lo compacto que es un suelo; sin embargo, para la interpretación de los fenómenos que suceden en el interior de los suelos, es necesaria una relación recíproca con las otras propiedades físicas de éste, como la textura, la densidad real y el espacio poroso. Por ejemplo, en condiciones normales, densidades aparentes de 1.0 a 1.5 g/cm<sup>3</sup> son representativas para texturas finas, donde predominan las partículas del

tamaño del limo y arcilla; puede haber gran cantidad de poros pequeños y el agua penetra despacio, además de que las condiciones de humedad permanecen por más tiempo en el lugar de enterramiento provocando reacciones químicas perjudiciales para los minerales de los huesos.

En otro sentido, densidades de 1.5 a 2 g/cm<sup>3</sup> son representativas de texturas gruesas, provocando que el agua penetre rápidamente por los espacios grandes promovidos por las arenas, provocando procesos de lixiviación rápidos en todos los perfiles del suelo; aunque el agua perjudica a los huesos, también sucede que la evaporación es rápida cuanto deja de penetrar agua (Ortiz 1977).

La densidad aparente puede variar por muchas causas, siendo una medida común en la relación entre los sólidos y los poros en un momento dado. De esta propiedad depende el contenido de agua en los suelos (Gavande 1979), además de la profundidad y de la alternancia mojado-seco de acuerdo con las estaciones del año; así como también, por el contenido de materia orgánica presente, la cual tiene relación con la compactación; por ejemplo, los subsuelos densos pueden tener densidades aparentes de 2.0 g/cm<sup>3</sup> o mayores (Ortiz 1977).

La trascendencia de analizar la densidad aparente, la densidad real y la textura de los suelos radica en el conocimiento y comprensión de la dinámica del drenaje interno y externo de éstos, porque únicamente de esta forma podemos comprender el grado en que está afectando químicamente el agua a los materiales óseos en los contextos de enterramiento.

- Método: para evaluar la masa del suelo (partículas sólidas y espacio poroso) se utilizó el método de la Probeta, según lo descrito por Gavande (1979).
- Fórmula:  $DA = \frac{\text{peso de la probeta más suelo (g)} - \text{peso de la probeta sola (g)}}{10 \text{ cm}^3}$
- Unidades: g/cm<sup>3</sup>

## B. Densidad real

Esta densidad se refiere a la masa (peso) de una unidad de volumen de partículas sólidas del suelo. Se trata sólo de la densidad de las partículas sin considerar el espacio poroso. El tamaño y arreglo de las partículas del suelo no afectan la densidad; sin embargo, de igual forma como ocurre con la densidad aparente, la materia orgánica influye de manera fundamental. Esto quiere decir, que algunos suelos superficiales de alto contenido orgánico y mineral, pueden decrecer en su densidad de partículas hasta valores menores a  $2.4 \text{ g/cm}^3$  (Ortiz 1977). También puede ser por la escasez de cuarzos y feldespatos, y la presencia de minerales como carbonatos o inclusive piroclastos. Los suelos orgánicos de turba pueden tener densidades de partículas extremadamente bajas. Los suelos con estas características promueven el paso del agua fácilmente porque son poco densos. Si los entierros se encuentran muy cerca de las capas superficiales la diagénesis es considerable durante los periodos de humedad constante.

- Método: a partir del método del picnómetro (Gavande 1979).
- Fórmula:

Donde:

$$\text{Densidad} = \frac{C - A}{[(C - A) + (B - A)] - (D - A)}$$

A = Peso del picnómetro

B = Peso del matraz + agua

C = Peso del matraz + suelo

D = Peso del matraz + suelo + agua

Unidades:  $\text{g/cm}^3$

## C. Porosidad

La diferencia entre la densidad aparente y la densidad real es el espacio poroso, el cual se refiere a la porción del suelo no ocupado por partículas sólidas. Los espacios porosos están ocupados por aire y agua. Por lo tanto, el arreglo de las

partículas sólidas del suelo determina la cantidad de espacio poroso. Esto quiere decir que, de acuerdo con la textura del suelo (arenosa o arcillosa), será la cantidad de espacio poroso total. Los suelos arenosos superficiales varían de 35 a 50% de espacio poroso total (EPT), mientras que los suelos de textura más fina tienen de 40 a 60%. Así, los suelos en donde predominan limos y arcillas tienen un mayor porcentaje de espacio poroso que los suelos arenosos. Esto tiene implicaciones en el tipo de drenaje que se desarrolla en los suelos y en la cantidad de humedad que éstos puedan retener. Espacios porosos altos, relacionados con texturas finas, generan drenajes deficientes impidiendo el paso del agua, generando condiciones de anegamiento severas que podrían prolongarse por largos periodos y generando reacciones químicas entre el suelo y el hueso durante tiempos prolongados. Por el contrario, porcentajes de espacios porosos pequeños, característicos de texturas gruesas, desarrollan drenajes eficientes y procesos de lixiviación rápidos.

La porosidad está formada por la suma de los porcentajes de poros de diferentes tamaños que actúan de la siguiente manera: los poros grandes sirven para el paso del aire y la infiltración; los poros medianos para la conducción de agua, y los poros pequeños para el almacenamiento de agua dentro del suelo. (Gavande 1979). Los suelos arenosos tienen una predominancia de macroporos y manifiestan un movimiento bastante rápido de aire y de agua a pesar de la pequeña cantidad de espacio poroso total. Los suelos de textura fina tienen una predominancia de microporos. Estos suelos tienen una mayor retención de agua en comparación con los suelos arenosos, pero el movimiento de aire y de agua es restringido (Ortiz 1977).

- Método: la diferencia entre la densidad aparente y la densidad real, es el espacio poroso.
- Fórmula:

$$E P = 100 \left( 1 - \frac{D A}{D R} \right) \quad \text{Unidades: \%}$$

## D. Textura

La textura es el análisis del tamaño de la partícula, característica morfológica del suelo que se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla. Estas partículas son las que exponen mayor área superficial y son las más activas, lo que hace que las propiedades químicas y físicas sean gobernadas por estas partículas. De acuerdo con la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) específicamente la clasificación de texturas se basa en la cantidad de partículas menores de 2 mm. La textura es muy importante y determinante porque afecta la física, la química y la biología del suelo. Es una propiedad que depende directamente del material madre. Por ejemplo; la arenisca y sedimentos marinos no consolidados dan origen a suelos de texturas arenosas. Los *loess*, que son ricos en limo, dan origen a suelos de textura migajón limosa, y la caliza generalmente produce suelos de texturas arcillosas.

Haciendo una clasificación general, se puede decir que hay suelos de textura gruesa y suelos de textura fina. En los suelos de textura fina predomina la arcilla, que tiene una mayor superficie activa que los suelos arenosos. Por el contrario, estos últimos son menos porosos, pero su tamaño de poro es mucho más grande permitiendo una rápida infiltración del agua. No obstante, los suelos arcillosos tienen una capacidad superior de retención de agua por su mayor área superficial; tienen mayor espacio poroso que los suelos arenosos. Esta diferencia se debe al mayor número de microporos que funcionan en la retención del agua. En los suelos arenosos hay más macroporos que funcionan en el movimiento del aire y del agua. Entre más grande es la partícula mayor es el drenaje y menor es la retención de humedad (Ortiz 1977).

Cuando el agua se infiltra en el suelo, llena el reservorio de humedad hasta rebasarlo en cada intervalo sucesivo de profundidad. Por lo tanto, la cantidad de agua que entra en un suelo dado, en cierto tiempo, depende de la cantidad de agua que ese suelo puede almacenar y de la velocidad con que el exceso de agua se transmite a través del suelo húmedo. El total de agua que entra en un suelo dado es mayor cuando el suelo está seco que cuando está mojado; sin embargo,

la velocidad con que el agua avanza a través del suelo es menor cuando el suelo está seco (Gavande 1979).

El análisis de la textura ayuda a determinar el paso de agua y de aire. Los fenómenos diagenéticos suceden por la presencia de agua; de aquí la trascendencia de ésta característica del suelo en los sitios arqueológicos, porque, en conjunto con las otras propiedades físicas antes mencionadas, se pueden explicar dichos fenómenos.

- Método: se utilizó el estudio propuesto por Bouyoucus en 1932 y modificado por Villegas en 1978. Se trata de un análisis por sedimentación diferencial que consiste en determinar el porcentaje de arena, limo y arcilla, a partir del método del hidrómetro por el cual se determina la cantidad de sólidos en suspensión (Villegas *et al.* 1978).

## 4. Análisis químicos

### A. Potencial de hidrógeno

Es una propiedad química determinante cuya influencia directa en la solución del suelo se debe a la actividad del ión hidrógeno, proporcionando diferentes concentraciones de iones hidrógeno ( $H^+$ ) e hidroxilo ( $OH^-$ ). Sus características vuelven ácido o alcalino al suelo si no se encuentran de una manera balanceada. Esto significa que la reacción o pH del suelo está influenciada por una serie de factores que hacen que éste varíe de manera muy marcada de un lugar a otro, e incluso en un mismo lugar, pero a diferentes profundidades. El pH se expresa con base en la concentración de los iones de hidrógeno que se miden en una escala de 0 a 14. El valor 7 se considera neutro, menos de 7 ácido y por encima de 7 alcalino. Cuando los  $H^+$  exceden a  $OH^-$  en una solución, ésta es ácida; inversamente, cuando  $OH^-$  exceden a  $H^+$ , la solución es básica. Sólo los iones hidrógeno disociados ( $H^+$ ) afectan a un electrodo sensible; consecuentemente el



hidrógeno no disociado no es parte de la concentración de iones hidrógenos y por lo tanto no se incluyen en la medida de pH.

Muchos suelos ácidos son de naturaleza turbosa y frecuentemente contienen una alta proporción de azufre o aluminio. En las regiones áridas del mundo se encuentran suelos fuertemente alcalinos. Con el aumento de la acidez de un suelo se hacen móviles elementos como hierro, magnesio, cinc y cobre, entre otros elementos menores. Así, con valores bajos de pH, un suelo puede contener cantidades tóxicas de ciertos elementos (Bohn *et al.* 1993).

El pH está influenciado por una serie de factores en donde el clima tiene un papel importante. En las regiones áridas el pH del suelo es generalmente más elevado que en las húmedas, porque las aportaciones orgánicas son casi siempre inferiores a las de los climas lluviosos, hay menor actividad microbiana por escasez de humedad y de vegetales. En estas regiones hay precipitaciones que no drenan pero que son capaces de elevar las sales disueltas por capilaridad, haciéndolas subir hacia los niveles superiores del suelo.

El agua es el principal factor de la reacción del suelo, ya que su abundancia o escasez produce los principales efectos sobre el pH. La lluvia, el drenaje superficial, el drenaje interno, la naturaleza del material madre y la cantidad de agua son los factores principales que influyen en la reacción del suelo. Bajo cualquier condición de lluvia, los suelos ácidos se forman más fácilmente de rocas ígneas ácidas como granitos, riolitas y rocas sedimentarias (areniscas), que de las rocas ígneas básicas, como los basaltos. Los suelos turbosos desarrollan acidez predominantemente de los ácidos orgánicos, los que se forman por la descomposición de grandes cantidades de materia orgánica. En el caso de los suelos minerales, la acidez del suelo podría definirse simplemente como una condición de baja saturación de bases (Ortiz 1977).

- Método: se determinó utilizando el potenciómetro Corning, mediante una relación suelo/agua de 1:2.5 (Grande 1984).

## B. Materia orgánica

La materia orgánica (MO) del suelo está constituida por residuos de animales y plantas resintetizados parcialmente (Bohn *et al.* 1993). La materia orgánica tiene gran influencia sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. Significa que, al ser la fracción química más activa del suelo, almacena varios elementos esenciales, estimula la estructura adecuada del suelo, es una fuente con capacidad de intercambio de cationes y regula los cambios de pH; propicia también las reacciones convenientes entre el aire y el agua en los suelos y es un enorme depósito geoquímico de carbono. Igualmente, como sucede con otras características físico-químicas del suelo, las cantidades de materia orgánica dependen de una serie de factores ambientales.

Los suelos varían grandemente en su contenido de materia orgánica, un suelo típico de las praderas puede tener de 5 a 6% de MO por unidad de masa en su superficie, en tanto que el suelo desértico arenoso puede contener menos de 1%. Los suelos con drenaje insuficiente tienen contenidos mayores de 10%, algunos suelos turbosos se aproximan a 100%.

El clima desempeña una función relevante en la determinación del contenido de MO porque ejerce una gran influencia en la distribución del tipo de plantas, del material producido por ellas y de la intensidad de la actividad microbiana. Se trata de varios factores bien integrados que actúan conjuntamente.

La materia orgánica genera el ambiente propicio para las reacciones químicas que tienen relación con la diagénesis del hueso en dos direcciones: un sentido físico y un sentido químico. El primero significa que a mayor materia orgánica mayor drenaje, y por tanto, mayor retención de humedad, y el segundo que la materia orgánica genera ácidos húmicos que tienen dos consecuencias: a) si bien, estos ácidos se clasifican dentro de los ácidos débiles, implica mayor actividad con el hueso contaminándolo, y b) estos ácidos húmicos provocan disminución del pH hacia la parte ácida.

- Método: fue determinada mediante una combustión húmeda, utilizando el método de Walkley y Black 1935 (Black 1970).

### C. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la evaluación de las sales totales solubles en el suelo; se trata de una medida indirecta de la cuantificación de las sales totales. Su objetivo consiste en cuantificar la suma de todas, sólo con la condición de que estas sales sean solubles (que rápidamente se disuelven en agua, que sean móviles), que pueden reaccionar rápidamente con su entorno. Nos da un parámetro de la cantidad de sales en el suelo provenientes de la descomposición de rocas, materia orgánica y hueso. Demasiadas sales solubles implican que se ha descompuesto cualquiera de los tres. Al ser una técnica que aporta información de la salinidad que tiene un suelo, es un complemento de la capacidad de intercambio catiónico total (CICT). La salinidad se mide en términos de la conductividad eléctrica de la solución del suelo. Esta conductividad refleja la concentración total de cationes. Los extractos de suelo salinos contienen típicamente algunos cationes diferentes, de sodio, calcio, magnesio y potasio.

Los suelos afectados por sales son comunes en las regiones semiáridas y áridas, donde la precipitación anual es insuficiente para satisfacer las necesidades de evapotranspiración de los vegetales. Aunque también puede presentarse en regiones subhúmedas y húmedas, pero en condiciones propicias. Las causas más comunes de la salinidad del suelo son la precipitación atmosférica, las sales que quedan de los primeros medios lacustres y marinos y el intemperismo de los minerales. Esto significa que el origen de todas las sales existentes en el suelo es la exposición al ambiente de las rocas y los minerales de la corteza terrestre de donde se han liberado sales durante el intemperismo físico y químico. Por ejemplo, en las regiones húmedas el agua de las lluvias que se filtra en el suelo acarrea las sales solubles y finalmente las transporta a grandes corrientes de agua. En las regiones áridas, por lo general, la lixiviación (el paso del agua a

través de los perfiles del suelo) arrastra a su paso toda clase de productos y sustancias solubles en agua (Gavande 1979).

Las sales se almacenan como resultado de la escasez de lluvias, por tasas altas de evaporación y transpiración o por características topográficas irregulares. La sal se acumula en los lugares situados en el declive por causa de la interrupción del drenaje del terreno. Varios factores influyen en los grados de salinidad del suelo; por ejemplo, las sales presentes en la lluvia que se produce cerca de la costa, contienen cantidades elevadas de sodio, cloruro y magnesio. En la precipitación tierra adentro predominan los sulfatos, bicarbonatos de calcio y magnesio (Bohn *et al.* 1993).

- Método: se cuantificó utilizando el extracto de la pasta de saturación por medio de un puente de conductividad (Allison *et al.* 1980).

#### D. Capacidad de intercambio catiónico total

Esta técnica indica la capacidad que tiene un suelo de retener cationes. Se trata de averiguar cuántos elementos químicos son capaces de ser retenidos por el complejo de cambio (arcilla y materia orgánica). Las arcillas, al exponer mayor área superficial por gramo, son las más activas del suelo, tanto física como químicamente. Al presentar una superficie específica grande, son por lo general de mayor carga eléctrica y de mayor capacidad de intercambio de cationes. Si hay una buena retención de elementos en las arcillas, en consecuencia no hay un desbalance en la concentración de compuestos, se establece un equilibrio. Los cationes intercambiables son el H de los ácidos libres, los de elementos alcalinos y alcalinotérreos  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , también hay en menor proporción  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mn}^{++}$ ,  $\text{Zn}^{++}$  y  $\text{Cu}^{++}$  y, en algunos suelos muy áridos,  $\text{Al}^{+++}$ . Esto significa que las arcillas, por tener cargas eléctricas negativas, pueden adsorber más cationes. Entonces, cuando hay más capacidad de adsorber cationes es más fácil que haya reacciones químicas que provocan la diagénesis del hueso.

No sólo las arcillas tienen cargas negativas, sino también la materia orgánica, por lo cual también ésta tiene capacidad para adsorber cationes; por consiguiente, entre más alto es el contenido de arcilla y de *humus* en un suelo, mayor será la capacidad de intercambio. En suelos de regiones húmedas el porcentaje de saturación de bases es menor que en los suelos de regiones secas. En el primer caso suele predominar el H<sup>+</sup> adsorbido, mientras que en las regiones áridas la saturación de cationes básicos puede ser de 90% o mayor (Ortiz 1977).

Por este motivo, la capacidad de intercambio puede ser alterada principalmente por el tamaño de las partículas, la temperatura y el medio externo. Por otra parte, hay factores que regulan el poder de intercambio de cationes: la naturaleza del ión, del anión, el porcentaje de posiciones iónicas ocupadas, el calor y la naturaleza del mineral.

El desequilibrio químico está en función de tres circunstancias: a) clima, en especial de la lluvia, provocando, por medio de su abundancia, que los cationes salgan de los compuestos químicos; b) drenaje: si es eficiente, hace que los elementos químicos salgan del suelo, y c) tipo de minerales de la arcilla: puede ser caolinita, montmorilonita e illita. No todos éstos tienen la misma carga electrostática, todos retienen cationes y tienen cargas negativas, pero cada uno de ellos interviene de forma diferencial en el desequilibrio químico.

- Método: por medio de la saturación con cloruro de calcio, percolación con cloruro de sodio y cuantificando el calcio en el extracto por el método del versenato (Jackson 1964).

## 5. Espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS)

Esta técnica, descrita en el capítulo anterior, se aplicó únicamente a cinco muestras de suelo del lugar de enterramiento, las que estaban en contacto con los esqueletos y que se obtuvieron cerca de los fémures; sobre todo con el fin de obtener información de la química del suelo relacionada directamente con los huesos (Cuadro 7).

*Cuadro 7.* Muestras de suelo que se analizaron por medio de la técnica EDS

---

No. de muestra				
Atrio			Capilla	
2	7	8	4	6
Profundidad 20 cm	Profundidad 70 cm	Profundidad 80 cm	Profundidad 40 cm	Profundidad 60 cm

---

## Capítulo VII. Resultados y su discusión

---

En el transcurso de los capítulos anteriores hicimos notar que la diagénesis del hueso está influenciada por varios fenómenos interrelacionados. La degradación del mineral del hueso también tiene relación con la destrucción de su fase orgánica.

En este sentido, los principales argumentos del presente trabajo se han encaminado al análisis de los procesos relacionados con la diagénesis de la fracción mineral del hueso. La diagénesis se asocia con las características ambientales de los sitios arqueológicos. Dentro de ellas sobresale el clima, la geomorfología y la vegetación. También es trascendente la profundidad de enterramiento, donde las condiciones físicas del suelo, como la textura, influyen en la rapidez con la que el agua penetra al contexto de enterramiento hasta hacer contacto con los esqueletos. En particular, el pH del suelo es un indicador clave en la diagénesis, porque de este marcador dependen las reacciones químicas que afectan la composición química del hueso.

### 1. Factores ambientales relacionados con la diagénesis del hueso

El estudio del ambiente de enterramiento fue el paso inicial en la explicación de la degradación del hueso de origen arqueológico; el clima, la geomorfología, la vegetación y los suelos, donde están asentados los sitios arqueológicos, influyen de forma variable cada uno de ellos en los diferentes grados de diagénesis.

#### A. Clima

El clima es el elemento primordial en la degradación de los huesos debido a que interviene de forma directa en otros fenómenos ambientales. La lluvia, promovida por el clima, está asociada con el intemperismo químico del hueso. El intemperismo es definido por Bohn *et al.* (1993) como la destrucción por cambios químicos de los materiales geológicos y biológicos. El hueso es un material que

reacciona químicamente en presencia de humedad, sobre todo por su condición química y su porosidad; sus elementos químicos, como el Ca o el P, tienen afinidad con el agua y dependiendo de la cantidad de ésta en el ambiente de enterramiento será su degradación.

En Los Olmos, 80% de las lluvias torrenciales se precipitan durante cuatro meses, la mayoría se escurre por el drenaje superficial y una parte no muy considerable por el drenaje interno. Puesto que las precipitaciones son escasas (545 mm al año, con máxima de 120 mm en agosto y mínima de 10 mm en diciembre) el agua que penetró en los estratos del suelo del atrio y la capilla fue mínima. Los restantes milímetros se repartieron durante todo el año, el suelo se humedeció a poca profundidad y después el agua se evaporó rápidamente (Figura 21).

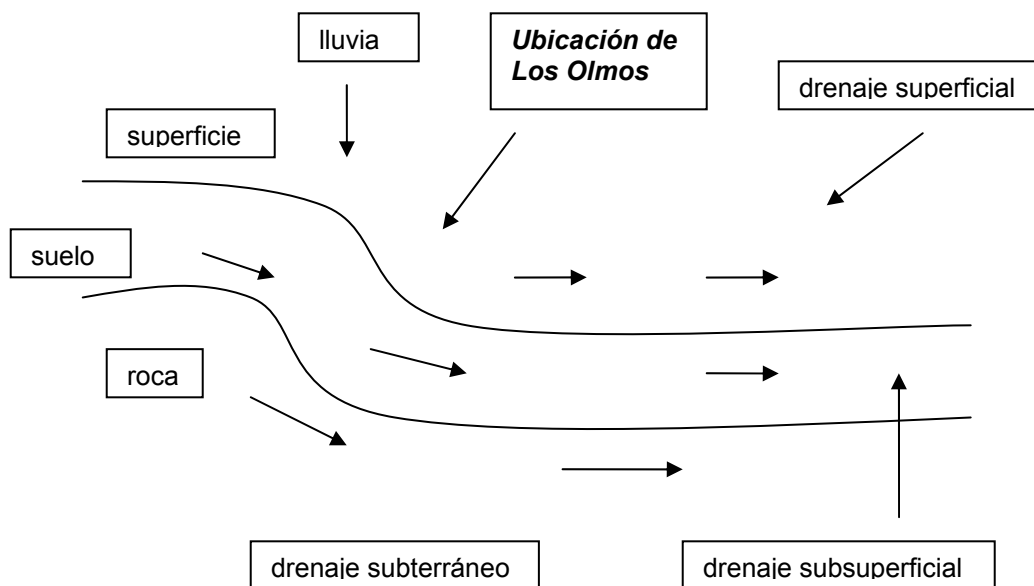


Figura 21. Vista en perfil de la ubicación de Los Olmos para señalar que la mayor parte del agua escurrió por drenaje superficial, lo que atenuó las condiciones de humedad en el lugar de enterramiento

En esta perspectiva, desde el punto de vista climático la diagénesis de los esqueletos excavados en Los Olmos no fue severa debido al clima semiárido de la región. Se trata de osamentas que permanecieron alrededor de 450 años en circunstancias favorables; es decir, aunque el agua penetró en el suelo y generó



condiciones de humedad para que ocurrieran reacciones químicas entre los elementos del suelo y la hidroxiapatita del hueso, no fue suficiente para saturar el suelo de agua durante mucho tiempo.

## B. Geomorfología

El fenómeno que puede aumentar o disminuir el efecto del agua y, en consecuencia, del clima es la geomorfología. Ésta se entiende como el relieve del entorno donde se encuentra el sitio, en especial la posición de la tumba en el relieve. Esta localización del esqueleto puede variar las condiciones dadas por el clima; es decir, por dar un ejemplo, puede suceder que el lugar de enterramiento se localice en una zona inclinada y, a pesar de que haya lluvias durante la mayor parte del año, el agua que permanece en el suelo no es la suficiente como para dañar la estructura del hueso, porque la inclinación evita que la mayoría del agua penetre en el suelo (Figura 22).

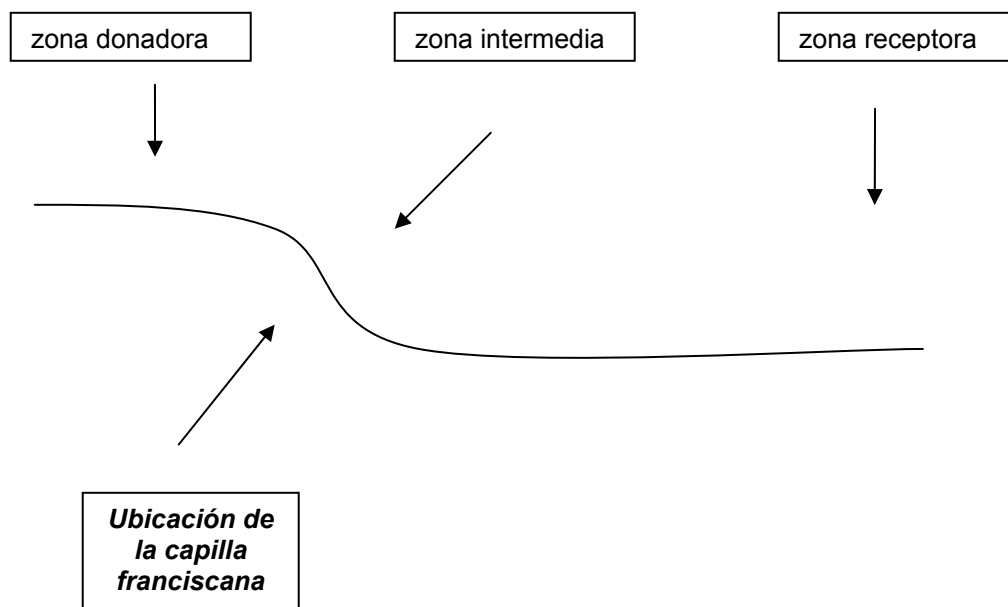


Figura 22. Vista en perfil del sitio en la geoforma, señalando que la capilla franciscana se ubicó en una pendiente ligera, lo que favoreció que la zona no retuviera grandes cantidades de agua

En la geoforma puede haber varias zonas de enterramiento, para el caso de Los Olmos la capilla franciscana se ubicó en un lugar con una pendiente ligera que no retuvo grandes cantidades de agua. Desde el punto de vista del drenaje, se trata de la parte baja de la zona intermedia, y aunque el sitio recibía agua, ésta siguió escurriendo hasta las zonas planas. La geoforma no acentuó ni atenuó los procesos del clima, pero sí contribuyó, por medio de los procesos de lixiviación, a remover compuestos químicos producto de las reacciones químicas entre el suelo y el hueso, derivadas de la presencia de humedad.

### C. Vegetación

La vegetación es otro de los factores que tiene influencia en la diagénesis ósea dependiendo de su escasez o abundancia en los sitios arqueológicos. La vegetación influye en la distribución del agua. Si un suelo tiene 100% de cobertura vegetal, se puede decir que no hay drenaje superficial y, en consecuencia, no hay erosión pero sí hay fenómenos de lixiviación. La vegetación puede obstaculizar el libre paso del agua por la superficie del suelo.

Entre menos cobertura vegetal tenga un suelo mayor es el drenaje superficial y, por consiguiente, el agua que penetra en éste es escasa, porque la mayoría del agua fluye libremente por la superficie del suelo. En Los Olmos hay drenaje superficial activo, ya que es un sitio que tiene aproximadamente 30% de cobertura vegetal, que consiste mayoritariamente de una serie de arbustos espinosos que requieren poca agua para vivir; en realidad se trata de un suelo “desnudo”. La escasa vegetación hizo que disminuyera el agua que penetró al interior del sitio de enterramiento y, por lo tanto, los procesos diagenéticos no fueron severos. Con poca humedad las reacciones químicas entre el hueso y el suelo fueron menores.

## 2. Características físicas y químicas de los suelos en Los Olmos

En el Cuadro 8 se presentan los resultados de los análisis físicos y químicos de los suelos. Debido a la cercanía entre los tres pozos del atrio y por la similitud en los resultados, los valores se promediaron. En consecuencia, los valores que se refieren al atrio corresponden al promedio de los valores de los tres pozos.

*Cuadro 8*  
Resultados de los análisis físicos y químicos del suelo

Pozo	Propiedades físicas						Propiedades químicas			
	DA gr/cm <sup>3</sup>	DR gr/cm <sup>3</sup>	EP %	Textura %			pH 1:2.5	MO %	CE mmhos/cm	CICT meq/100g
			Arcilla	Limo	Arena					
Atrio	1.16	2.2	47.27	3	33	65	7.84	5.21	6.70	30.1
	1.20	2.5	52.00	7	34	59	8.05	3.11	2.11	23.3
	1.21	2.1	42.38	7	33	60	8.00	5.23	2.45	21.9
	1.15	2.1	45.23	3	34	63	8.21	4.64	1.46	22.8
	1.10	2.6	57.69	5	34	61	8.11	4.81	2.34	19.3
	1.20	2.2	45.45	5	41	54	8.29	4.21	1.50	17.9
	1.11	2.4	53.55	4	35	61	8.28	3.97	2.65	19.9
	1.14	2.3	50.43	6	34	60	8.10	4.12	2.40	21.4
Capilla	1.14	2.1	45.71	3	40	57	7.02	5.84	1.49	25.1
	1.20	2.4	50.00	4	39	57	7.94	7.45	4.30	22.1
	1.18	2.1	43.80	5	38	57	7.95	7.34	9.28	26.3
	1.17	2.1	44.28	6	37	57	8.07	7.19	6.87	23.7
	1.22	2.3	46.95	5	39	56	7.99	7.74	8.11	26.1
	1.19	2.3	48.26	8	40	52	8.03	8.55	7.21	28.1
	1.24	2.3	46.08	6	34	60	8.50	7.46	5.73	24.7

DA = Densidad aparente. DR = Densidad real. EP = Espacio poroso. MO = Materia orgánica  
CE = Conductividad eléctrica. CICT = Capacidad de intercambio catiónico total

## A. Característica física del suelo

Las propiedades físicas de los suelos están dirigidas a la explicación de su drenaje. El drenaje es importante ya que de él dependen los diferentes grados de diagénesis del hueso, porque determina la retención de agua y los procesos de lixiviación. En consecuencia, la física del suelo modifica las condiciones climáticas y geomorfológicas del sitio arqueológico, pues acentúa o disminuye las condiciones de humedad.

La textura arenosa del suelo del atrio favoreció la filtración del agua, y en el interior de la capilla la superficie del suelo que estaba cubierta por una capa de estuco de cinco centímetros de grosor, la cual modificó el paso del agua al interior de las tumbas (Cuadro 8).

Los análisis de textura del suelo del atrio revelaron, por la predominancia de texturas gruesas, alrededor de 63% de arena, que es un suelo con drenaje adecuado porque contiene macroporos, lo que provocó que el agua penetrara más fácilmente. Estos poros intervinieron de forma considerable en el drenaje y en el aumento de humedad, que desde el punto de vista del intemperismo químico, ésta hace que se degrade más fácilmente la hidroxiapatita del hueso. Sin embargo, los valores de limos y arcillas, 33% y 6%, respectivamente, dieron la pauta para pensar que, aunque la zona de enterramiento estuvo bien drenada, también retuvo humedad, porque estas partículas que desarrollan espacios porosos pequeños hicieron que se detuviera parte del agua por más tiempo en el lugar de enterramiento. Esto indicó que los procesos de lixiviación en Los Olmos no fueron fuertes en el interior del suelo; aunque después de las precipitaciones permaneció humedad en los estratos por un par de meses más favoreciendo reacciones químicas que degradaron al hueso.

Por el tipo de textura se hubieran esperado densidades altas, características de suelos con partículas grandes como las arenas, sin embargo, se encontraron densidades más bajas de lo esperado, la densidad aparente, con valores entre 1.1 a 1.2 g/cm<sup>3</sup>, que es un valor típico de texturas finas, indicó que aunque es bajo el porcentaje de estas partículas, fue lo suficientemente

considerable, aunado al valor de arcillas, para hablar de una retención importante de humedad; además, estas densidades aparentes bajas se justifican por los altos contenidos de materia orgánica, la cual hace menos denso al suelo que, según Bohn *et al.* (1993), después de 4% ya se pueden considerar valores altos de ésta.

En el atrio hubo valores altos de materia orgánica, entre 5.2% y 3.1%, lo que también se confirmó por los valores bajos de densidad real, alrededor de 2 g/cm<sup>3</sup>. Las concentraciones altas de materia orgánica provocaron que el suelo se expandiera para el paso del agua, promoviendo un drenaje eficiente. También en el interior de la materia orgánica sus poros pequeños retuvieron humedad. No obstante, aunque los restos óseos estuvieron expuestos a condiciones de humedad, debido a las partículas pequeñas que promovieron microporos, estas circunstancias no fueron tan severas como para hablar de diagénesis fuerte.

Las características físicas del suelo, en cuanto al paso del agua y la retención de humedad en el sitio de enterramiento, indicaron que lo que sucedió en el primer estrato se repitió en los estratos inferiores, incluso por debajo de los esqueletos; porque el suelo analizado que se encontraba por debajo de los esqueletos, alrededor de 70 cm de profundidad, mostró que la dinámica seguía promoviendo un drenaje similar en cuanto a la acumulación de humedad.

Estas características físicas, aunadas a la escasa precipitación que hay en Los Olmos, y a la profundidad de enterramiento de las osamentas, no promovieron condiciones de humedad fuertes en los entierros; en consecuencia, hubo escasas reacciones químicas generadas por la permanencia de humedad, causando que la parte orgánica y mineral del hueso no se degradara rápidamente.

En el suelo del interior de la capilla, por las diferentes condiciones en el acondicionamiento de la tumba, hubo cambios en la dinámica hídrica a causa del piso de estuco en la primera capa superficial. Los análisis físicos que indicaron valores considerables de limos aportaron los elementos suficientes para entender la existencia de microporos. Por ejemplo, en la mayoría de los estratos hubo alrededor de 40% de dichas partículas. Esto reveló que el paso del agua en el interior del perfil fue lento; pero además, también fue pausada la evaporación del agua en los periodos de sequía, haciendo probables reacciones químicas que

promovieron el desequilibrio de los elementos inorgánicos del hueso para destruirlo.

Las densidades bajas, características de texturas finas, estuvieron modificadas por la presencia de materia orgánica. Esta fracción orgánica, con valores mínimos de 5.8% y máximos de 8.5%, generó condiciones de porosidad mayores permitiendo un mejor drenaje. Si tomamos en cuenta que el drenaje en el interior de los suelos se mueve de forma vertical y de forma horizontal, entonces el agua que caía de la lluvia penetró en mayor proporción por la parte lateral de la tumba al estar el estuco de por medio; aunque también penetró por la superficie de éste, pero de forma más lenta. Como el estuco no es completamente impermeable, dejó pasar agua por sus pequeños poros, pero de forma muy lenta, evitando al máximo los procesos de lixiviación en comparación con las áreas en donde el suelo estuvo completamente al aire libre.

## B. Característica química del suelo

Como se mencionó en el capítulo anterior, el pH del suelo es determinante en la diagénesis, porque dependiendo de la acidez o alcalinidad dependerá el estado de los fosfatos de Ca del hueso. Si aumenta la condición del ión hidrógeno la hidroxiapatita se disuelve (Nicholson 1996). El H es muy inestable y rápidamente reacciona con materiales de su exterior; además, la cantidad de H tiene que ver con la solubilidad de otros elementos. Por otro lado, muchos hidrógenos se combinan con Ca, Mg, Na y K formando compuestos químicos que se pueden precipitar en los huesos (Bohn *et al.* 1993).

El pH del agua del suelo del enterramiento que se encuentra en sus poros (llamada *la solución del suelo*), también determina la naturaleza de los iones presentes en las reacciones iónicas de intercambio, debido a que contiene los compuestos químicos que provienen de la disolución de los materiales que componen al hueso y al suelo, materiales que son solubles al pH del ambiente (Bohn *et al.* 1993).

Para que se genere la acidez en el suelo es necesario que éste se origine de una roca madre de carácter ácido; esto es, rocas que sean pobres en Ca, Na y K, que la lluvia exceda más de 900 mm al año, provocando procesos de lixiviación, y el buen drenaje del suelo, generando muchos hidrógenos que destruyen al hueso a partir de reacciones de hidrólisis. Las condiciones básicas del suelo, cuando los OH exceden a los H<sup>+</sup>, también generan reacciones que perjudican la parte inorgánica del hueso. Se pueden considerar como condiciones básicas fuertes un umbral cercano o mayor a 8. Lo que sucede es que al disociarse el OH de un compuesto complejo, se convierte en un radical inestable formando compuestos químicos que también son agresivos al entorno (Bohn *et al.* 1993).

Los suelos en Los Olmos presentaron pH básicos, alrededor de 8, que también son dañinos para la estructura del hueso. Estas condiciones fueron desfavorables para el hueso a causa de los compuestos químicos promovidos por los OH. Con estos valores, la producción de compuestos agresivos, como carbonatos de calcio (CaCO<sup>3</sup>), fueron abundantes y se precipitaron en el hueso. El sitio de enterramiento del interior de la capilla también mostró condiciones básicas desfavorables.

Como se comentó anteriormente, la hidrología del lugar de enterramiento es un factor determinante en la disolución mineral, ya que influye en la saturación del agua con respecto a los iones Ca<sup>2+</sup> y PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. De aquí la importancia de la capacidad de retención catiónica, porque las soluciones saturadas pueden retardar la diagénesis.

La capacidad de intercambio catiónico total del suelo tiene relación con el pH, y se refiere a la capacidad que tiene el suelo de retener e intercambiar cationes (Bohn *et al.* 1993). El suelo retiene elementos químicos en su entorno, por lo cual, a mayor capacidad de intercambio es mayor la retención y mayor la estabilidad en el equilibrio químico entre el hueso y el suelo. Si hay más equilibrio entre ambos se reducen las reacciones químicas; entonces, la velocidad de degradación del hueso es lenta (Nicholson 1996). Por el contrario, con una capacidad de intercambio catiónico mínima, con una simple lluvia los fosfatos de calcio pueden salir del hueso a partir de condiciones ligeras de humedad,

generando una descompensación catiónica. Si el hueso está en un ambiente ácido se acelera la descomposición, salen más rápido los elementos del hueso, y si hay un drenaje eficiente dichos elementos son lixiviados y el hueso se desintegra más rápido.

La descomposición ocurre a partir de los elementos químicos que pueden ser retenidos en el complejo de cambio, establecido por las arcillas y la materia orgánica, estas dos tienen cargas negativas; sin embargo, la carga eléctrica negativa de la arcilla es permanente y está reteniendo elementos. Si es eficiente la retención de elementos en la arcilla, entonces no hay un desbalance en la concentración de los compuestos y en consecuencia se establece un equilibrio. El problema surge cuando el suelo tiene escasa capacidad de intercambio catiónico, es cuando el hueso comienza a ceder elementos al suelo para equilibrarlo, tomando en cuenta que en el hueso hay una gran concentración de elementos minerales, sobre todo de fosfatos de calcio.

Los suelos analizados mostraron capacidades de intercambio catiónico altas. Rebasaron 10 miliequivalentes en cien gramos de suelo, entre 17.9 y 30.1 meq/100g. Esto generó condiciones de equilibrio favorables entre los elementos del hueso y su entorno. La escasa precipitación del lugar no interfirió en lixiviar gran cantidad de elementos, los cuales hubieran creado poca estabilidad en el complejo de cambio como para que el suelo extrajera elementos del hueso generando su degradación (Bohn *et al.* 1993, Pate y Hutton 1988).

Como ya se ha comentado, el desequilibrio químico en el suelo está en función del clima, en especial de la lluvia, que a partir de su abundancia extrae elementos, y del drenaje eficiente que hace que dichos elementos sean lixiviados creando un ciclo que constantemente estaría perjudicando al mineral del hueso. Evidentemente, estos fenómenos no fueron tan marcados en los suelos de Los Olmos, permitiendo procesos diagenéticos lentos.

Por otra parte, la conductividad eléctrica es otra de las características químicas del suelo que aportan información de la diagénesis, a partir de las sales totales solubles que se encuentran en el mismo, como sales de Ca, Mg, Na y K, entre otras. Las sales solubles en el suelo implican la degradación del hueso.



Entre más sales hay en el suelo mayor será la conductancia eléctrica. Valores mayores de 4 mmhos/cm indican exceso de sales, compuestos químicos que están listos para salir si están las condiciones propicias para la lixiviación.

En los suelos de Los Olmos se encontraron sales, sobre todo de las rocas y de la materia orgánica. Se registraron conductividades menores a 4 mmhos/cm y alrededor de 5, lo que indicó escasez de humedad. Hubo pocas sales en movimiento y materiales escasos que desequilibraran. Los valores más altos de esta característica química, registrados en los estratos cercanos a la superficie, se debieron a que hay cierta tendencia de las sales a acumularse en la superficie, sobre todo por movimientos de capilaridad, un fenómeno frecuente en las zonas semiáridas. Esto fue consecuencia del clima, pese al buen drenaje, debido a las texturas gruesas el suelo lixivió sales generando desequilibrio constante por el movimiento de éstas.

### 3. Porosidad y densidad ósea

Con la metodología ya descrita en el capítulo correspondiente, se realizaron análisis de la porosidad y densidad ósea en treinta muestras considerando la sección media de la diáfisis de los fémures (Cuadro 9).

Con el objetivo de observar la distribución de los resultados obtenidos y considerando que se trató de dos sitios de enterramiento, atrio y capilla, y una muestra de hueso moderno, se utilizó el programa estadístico SYSTAT versión 10 para realizar las comparaciones correspondientes entre los tres grupos de estudio.

#### A. Porosidad

La porosidad es el primer indicador de diagénesis que se discute a continuación, sobre todo porque es uno de los cambios físicos del hueso que generalmente sucede en las osamentas arqueológicas y es de las características más estudiadas que tiene relación con otros marcadores diagenéticos como la densidad, que más adelante se comentará.

*Cuadro 9*

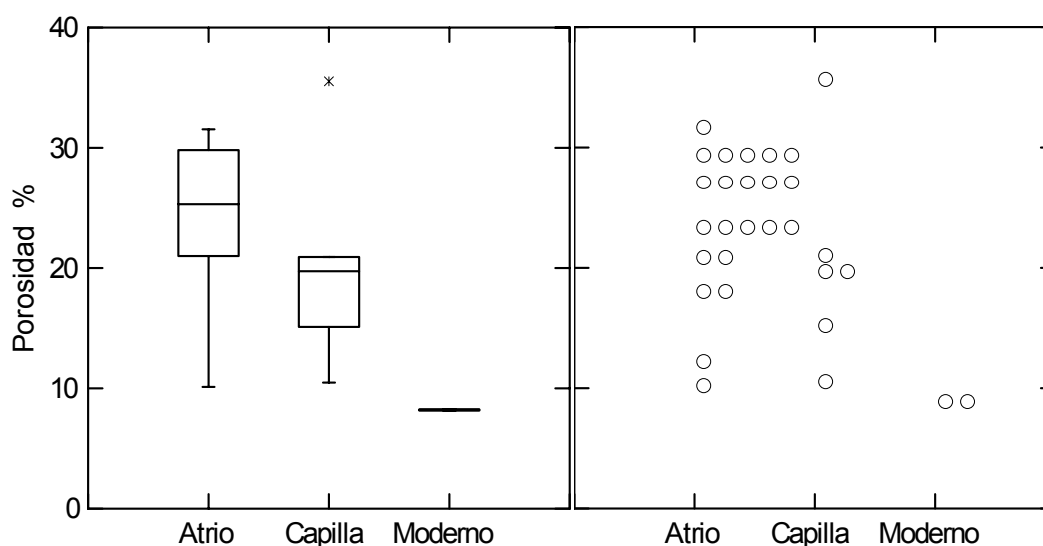
Resultados de la porosidad y la densidad de diáfisis de fémures.  
Temporada de excavación 1998 (A), y 2000 (B). "2R": huesos modernos

Muestra	Porosidad (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
1 A	28.81	2.26
3 A	23.67	2.16
7 A	31.55	2.46
12 A	30.36	2.21
14 A	27.54	2.34
20 A	20.19	2.26
22 A	30.53	2.30
25 A	26.41	2.28
30 A	28.71	2.11
35 A	20.53	2.02
39 A	15.11	2.16
44 A	20.92	1.75
51 A	35.53	2.21
1 B	22.63	2.30
2 B	10.12	2.24
3 B	23.88	2.18
4 B	26.53	2.26
5 B	18.25	2.17
6 B	21.00	1.98
7 B	12.06	2.26
8 B	30.13	2.03
9 B	23.55	2.31
10 B	24.22	2.11
11 B	10.48	2.26
12 B	30.10	2.40
13 B	18.96	1.90
14 B	26.73	2.08
15 B	17.93	2.19
54 A (2R)	8.15	2.03
55 A (2R)	8.26	2.02

De los resultados anteriores se obtuvo la estadística descriptiva para la porosidad. En el Cuadro 10 y Gráfica 1 se pueden apreciar las diferencias en las medias y medianas para esta característica del hueso. La porosidad fue más alta en los huesos del atrio y la capilla, en comparación con los huesos modernos. Estos últimos presentaron valores medios de 8.2%. La media de porosidad de 24.3% y de 20.2% de los fémures del atrio y la capilla, respectivamente, indicó que perdieron masa.

**Cuadro 10**  
 Estadística descriptiva para la porosidad ósea. Los huesos arqueológicos mostraron más porosidad que los huesos modernos

	Porosidad %		
	Moderno	Atrio	Capilla
N	2	22	6
Mínimo	8.150	10.120	10.480
Máximo	8.260	31.550	35.530
Mediana	8.205	25.315	19.745
Media	8.205	24.359	20.255
Desv. est.	0.078	5.900	8.456



*Gráfica 1.* Diagramas en donde se aprecia que los huesos del atrio y la capilla presentan valores de porosidad más altos, utilizando como referencia los huesos modernos. El diagrama de puntos muestra que los huesos arqueológicos tienen porosidades alrededor de 20%

Para complementar lo anterior, y por tratarse de tres poblaciones de estudio, se aplicó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis. La porosidad mostró diferencia significativa entre los tres grupos. Aunque la muestra arqueológica indicó más porosidad en comparación con los huesos modernos, los fémures del atrio fueron más porosos que los excavados en el interior de la capilla (Cuadro 11).

**Cuadro 11**  
Análisis de varianza y pruebas a *posteriori* de la porosidad

Grupo	Conteo	Suma - rango	Rango promedio (ordenado)
Atrio	22	390	Atrio 17.7
Capilla	6	72	Capilla 12.0
Moderno	2	3	Moderno 1.5

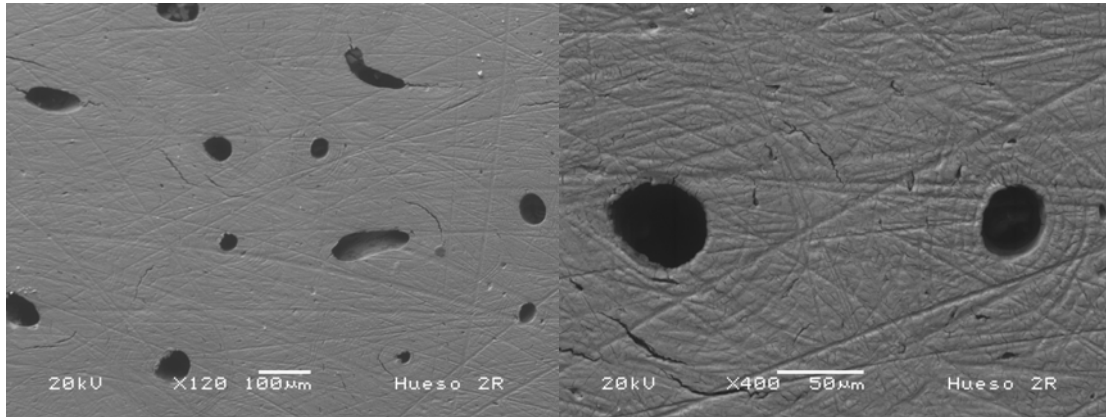
$K = 7.4, p = 0.02, \text{ji cuadrada con } 2 \text{ gl.}$

La pérdida de masa de las secciones medias de los fémures, que incluye pérdida de minerales y de componentes orgánicos, tuvo relación, entre otras cosas, con el relieve, el clima (lluvia) y el drenaje del suelo del sitio de enterramiento.

Por lo comentado al inicio de este capítulo, la comunidad de Los Olmos se ubica en una pendiente ligera, de aproximadamente 5 a 10° en pie de monte. A pesar de que hubo recepción de agua, ésta no permaneció por largos periodos y, en consecuencia, los procesos diagenéticos que causaron la porosidad del hueso sucedieron sólo en temporadas de lluvia y un par de meses después durante los periodos de evaporación del resto del agua.

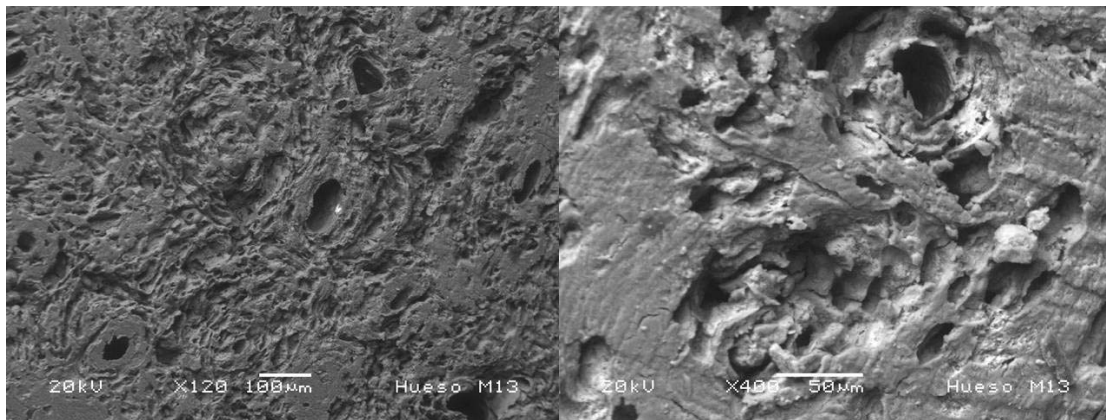
Los grados de porosidad de la sección analizada de los fémures, comparando el hueso moderno (Figura 23) con el hueso arqueológico (Figura 24), hizo evidente que hubo intemperismo químico en el hueso, causado por las reacciones químicas producto de la presencia del agua. Cuando el agua fue abundante y estuvo en contacto con los huesos, parte de la composición de éstos reaccionó químicamente.

Es relevante no olvidar que en los sitios arqueológicos el agua de la lluvia penetra en el suelo de forma diferencial, dependiendo de la vegetación, la inclinación del lugar o las características físicas del suelo. La acción del agua del suelo sobre el hueso generalmente disuelve y lixivía su componente mineral (Hedges y Millard 1995, Nielsen-Marsh y Hedges 1999).

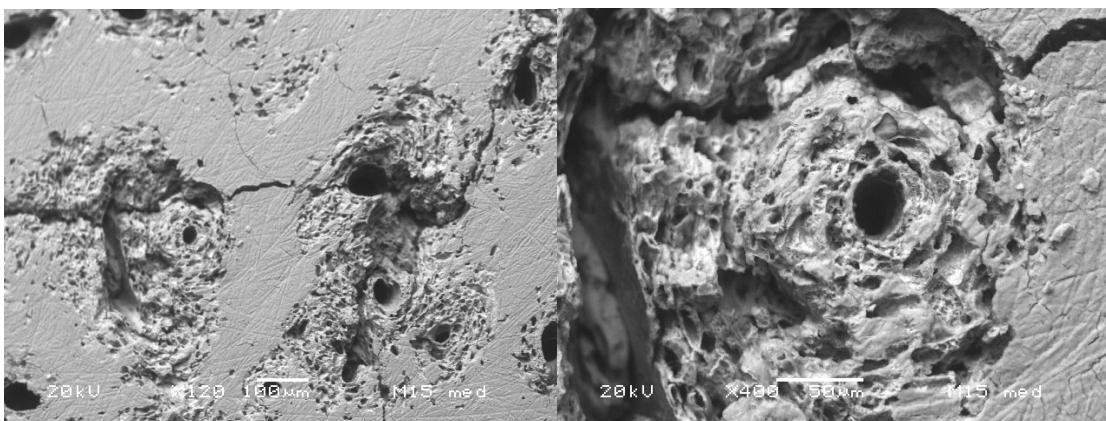


*Figura 23.* Imagen obtenida en un MEB-BV a 120 X y 400 X, que muestra el corte transversal de la diáfisis de fémur de un hueso moderno. Se notan los canales de Havers y las lagunas pero no hay una densidad de poros que indique destrucción como se observa en la imagen siguiente

a)



b)



*Figura 24:* Imagen a) y b) obtenida en un MEB-BV a 120 X y 400 X que muestran el corte transversal de la diáfisis del fémur de dos de los huesos analizados. Se notan los canales de Havers y la destrucción alrededor de éstos debido al intemperismo químico que provocó aumento de su porosidad. Inclusive, en la imagen b) hay grietas que se deben al intemperismo físico provocado por la filtración del agua y los cambios de temperatura

En Los Olmos, el agua que naturalmente se filtró por los estratos del suelo promovió intemperismo químico en el hueso generando su destrucción inorgánica, provocando también que el material descompuesto del hueso se transportara hacia los estratos inferiores como consecuencia de la lixiviación (agua con compuestos químicos en solución y en movimiento). Como el agua que penetra en el suelo tiene bióxido de carbono que se puede transformar en ácido carbónico, al entrar en contacto con el hueso reaccionó con éste y formó bicarbonato de calcio. Los carbonatos salen por solución e hidratación, y la carbonatación hizo que se disolviera el Ca del hueso, y si los procesos de lixiviación fueron fuertes, como sucedió durante las temporadas de lluvia, el hueso se degradó, aunque de forma moderada. También pudo suceder que el proceso de hidratación hizo que las moléculas de agua se pegaran a los compuestos químicos provocando el aumento de volumen de éstos y en consecuencia haciendo factible la descomposición rápida del compuesto, sobre todo del Ca, aumentando la porosidad del hueso.

Desde el punto de vista climático, la afectación en cuanto a la porosidad del tejido óseo no fue muy severa. El intemperismo químico, causado por las reacciones químicas entre los elementos del suelo y los elementos del hueso, no fue muy marcado y además fue lento. Las diáfisis de los fémures analizados tuvieron alrededor de 24% de porosidad pero aún mantienen su estructura, son resistentes al tacto, lo que también significa que todavía contienen colágeno como soporte de los minerales.

Por otra parte, los valores altos de porosidad de los huesos excavados en el atrio, en comparación con los de la capilla, se deben a que esa zona de enterramiento estuvo a “cielo abierto”, es decir, se trató de entierros directos, sólo se hizo una fosa y se enterraron. Lo contrario a los entierros del interior de la capilla, que estuvieron mucho tiempo protegidos por la nave de la capilla y el tiempo restante, después de su derrumbe, por el escombros y el piso de estuco. En el atrio, el agua de la lluvia, o de las corrientes cercanas, penetró directamente en los estratos del suelo promoviendo reacciones químicas entre los elementos químicos del hueso y aquéllos del suelo. En los esqueletos excavados en la capilla en cambio el proceso disminuyó porque las condiciones de humedad no fueron

tan severas como en el caso de los esqueletos del atrio. El suelo del atrio fue más permeable provocando diagénesis más constante de los huesos.

## B. Densidad

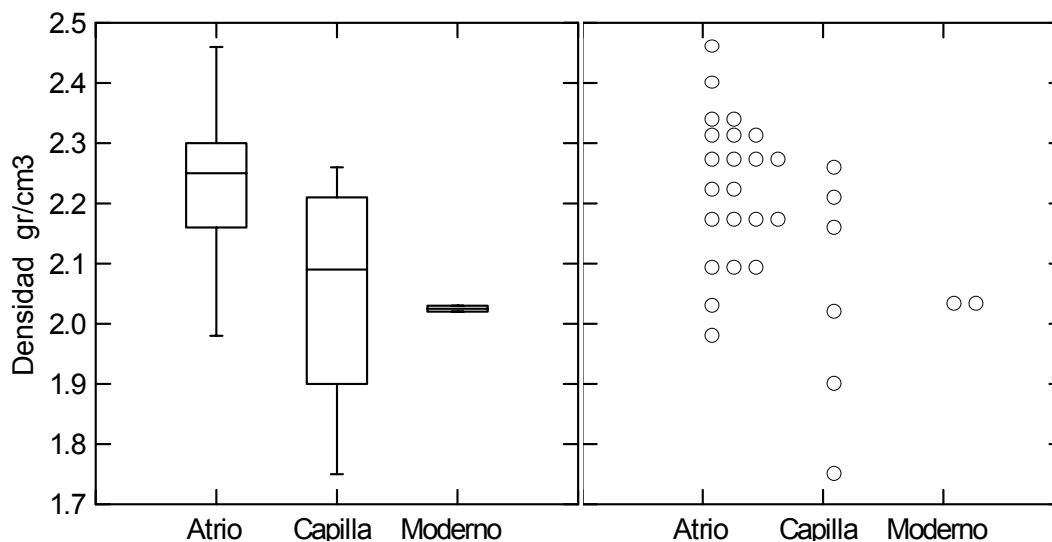
La densidad del hueso es el segundo marcador diagenético que aquí consideramos; está indicando también el estado mineral del hueso, como sucede con la porosidad. La densidad es la relación entre el peso mineral y orgánico y el volumen que ocupa. Se hizo el análisis exploratorio de los datos, y la mediana y la media de la estadística descriptiva arrojaron diferencias marcadas de la densidad ósea para los huesos del atrio en comparación con los huesos modernos y los enterrados en la capilla (Cuadro 12 y Gráfica 2).

*Cuadro 12*

Estadística descriptiva para la densidad ósea. Los huesos del atrio son más densos que la muestra de hueso moderno. Los huesos de la capilla muestran ligero aumento en su densidad

	Densidad g/cm <sup>3</sup>		
	Moderno	Atrio	Capilla
N	2	22	6
Mínimo	2.020	1.980	1.750
Máximo	2.030	2.460	2.260
Mediana	2.025	2.250	2.090
Media	2.025	2.222	2.050
Desv. est.	0.007	0.116	0.198

Se aplicó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis con respecto a los tres sitios de enterramiento. Con este método estadístico la densidad mostró una probabilidad de 0.02, indicando que sí hubo diferencia significativa entre los tres grupos. Los huesos del atrio fueron más densos que los otros dos grupos; sin embargo, los datos de la capilla no mostraron una tendencia clara, aunque los huesos modernos se mantuvieron con densidades menores que las muestras arqueológicas (Cuadro 13).



Gráfica 2. Diagrama que muestra las diferencias de densidad entre los huesos del atrio y los modernos. Aunque los valores de la capilla no muestran una tendencia clara para asegurar que son más densos que los huesos modernos

**Cuadro 13**  
Análisis de varianza y pruebas a *posteriori* de la densidad

Grupo	Conteo	Suma de rango	Rango promedio (ordenado)
Atrio	22	397	Atrio 18.0
Capilla	6	56	Capilla 9.3
Moderno	2	11	Moderno 5.5

$K = 7.3, p = 0.02, j_i$  cuadrada con 2 gl.

Los valores altos de densidad en los huesos arqueológicos se debieron a que se precipitaron compuestos químicos densos ajenos a la estructura del hueso. Esto fue consecuencia de la presencia del agua en el sitio de enterramiento, pues ésta acarrió compuestos químicos en solución que se precipitaron sobre el hueso. Este fenómeno también tuvo relación, como sucedió con la porosidad, con el relieve, el clima y las características físicas y químicas del suelo. Los huesos del atrio mostraron más claramente densidades altas en comparación con los huesos modernos; sobre todo, porque en el atrio las reacciones químicas entre el suelo y el hueso fueron más constantes que en el otro sitio de enterramiento, la capilla.



En el atrio, el agua penetró por la superficie y por el drenaje interno, por ese motivo las reacciones químicas fueron constantes, el hueso se humedeció y el pH de la matriz de suelo hizo fácil que se pusiera el Ca del hueso y el carbonato de calcio del suelo en solución. La geoforma contribuyó en los procesos de lixiviación; es decir, en el movimiento de los compuestos químicos del hueso, liberados por el intemperismo químico hacia la profundidad del suelo. No obstante, la capacidad de intercambio catiónico atenuó la movilidad de los compuestos químicos.

Aunque sucedió, la disolución de los cristales del hueso en los espacios libres precipitaron algunos compuestos sobre todo del tipo de los carbonatos de calcio, muy abundantes en los suelos de Los Olmos, con clima semiárido. Se agregaron iones que estaban en la solución del suelo afectando la estructura mineral y sobre todo el tamaño y densidad de los cristales de la apatita del hueso.

Los huesos de la capilla no mostraron una tendencia marcada, sobre todo porque los esqueletos de este lugar de enterramiento estuvieron “protegidos” de la filtración constante del agua de lluvia. Aunque algunos huesos fueron más densos que los contemporáneos, los procesos diagenéticos en ese sitio no fueron tan fuertes como en el atrio, ya que el piso de estuco protegió los entierros del paso del agua constante a través de los estratos del suelo.

Finalmente, aunque la porosidad nos indicó diagénesis del hueso, ésta no tuvo necesariamente relación directa con la densidad. La densidad reveló la evidente relación de equilibrio del hueso con su entorno inmediato, donde las reacciones químicas, provocadas por el agua, hicieron que se precipitaran en el hueso diferentes compuestos. Sobre todo, sabemos que durante el enterramiento parte de la fracción orgánica del hueso se perdió y también parte del fosfato de calcio de éste, provocando espacios en su estructura haciendo factible el paso de otros compuestos provenientes del suelo.

#### 4. Elementos químicos del suelo

De las muestras de suelo utilizadas para los análisis físicos y químicos se eligieron cinco, sobre todo las que estaban en el estrato donde se encontraron los

esqueletos, alrededor de 70 cm de profundidad, para aplicarles análisis químicos por medio de espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS). El siguiente gráfico (Figura 25) y los porcentajes (Cuadro 14) se obtuvieron para las cinco muestras de suelo. Los resultados se concentran en el Cuadro 15.

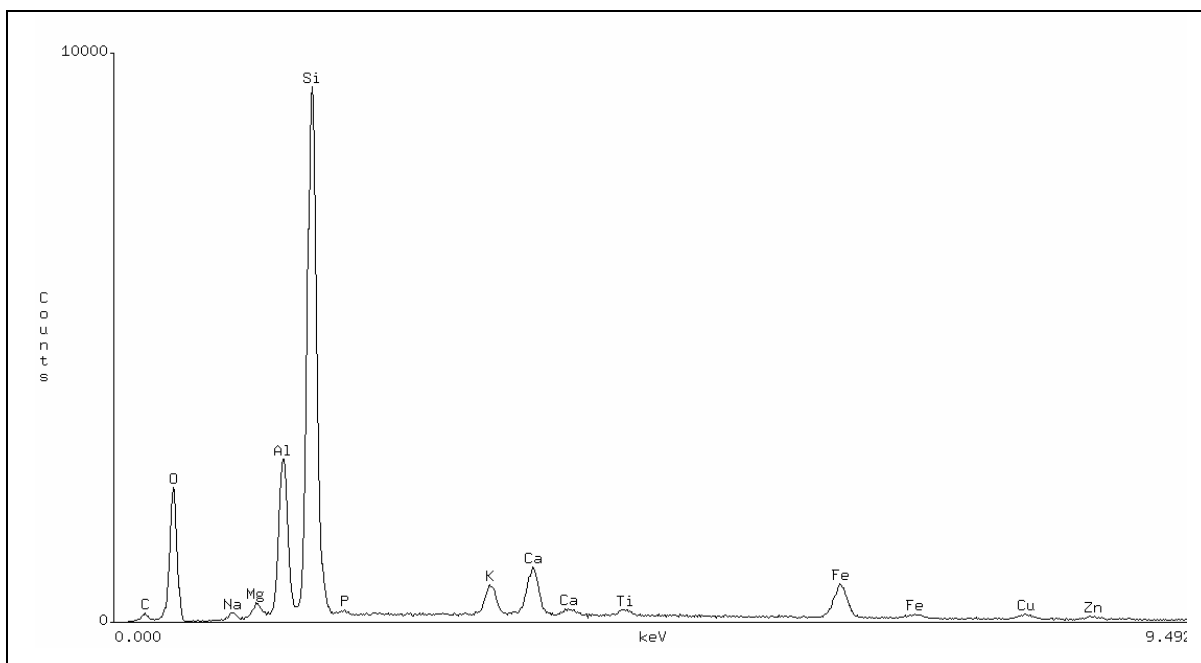


Figura 25. Identificación cualitativa de elementos a partir de su espectro característico de un análisis EDS. En esta muestra de suelo se aprecia la presencia relevante de Na, Mg, Ca, P, Fe y Al

Cuadro 14

Porcentajes de elementos químicos para una muestra de suelo obtenidos por medio del análisis de espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS)

Elemento	Porcentaje atómico (% at)	Porcentaje en peso (%wt)
Na	1.25	0.88
Mg	1.78	1.33
Al	15.70	13.07
Si	58.43	50.62
P	0.86	0.82
K	3.80	4.58
Ca	6.53	8.07
Ti	0.97	1.44
Fe	7.65	13.17
Cu	1.67	3.27
Zn	1.36	2.73
Total	100.00	100.00

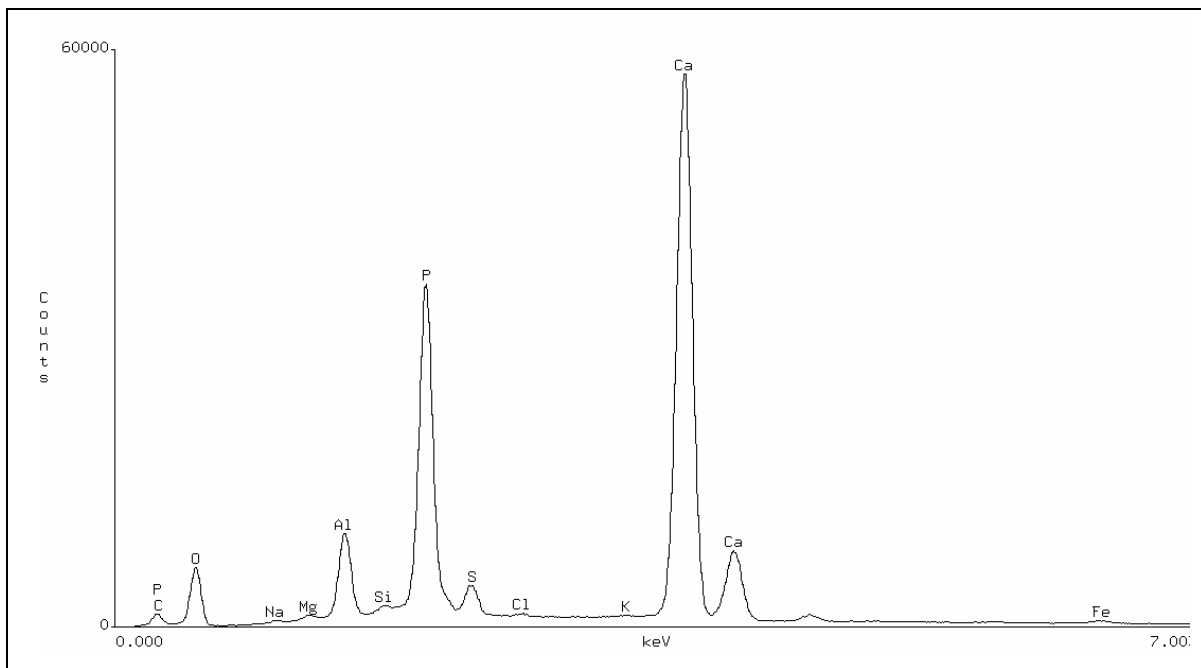
*Cuadro 15*

Resultados de la química del suelo por medio de MEB – BV. Se puede apreciar que Mg, P, Ca, Cu y Zn aumentaron con la profundidad. También hay cantidades reconocibles de Al, importante en la diagénesis del hueso

	2 (atrio)	7 (atrio)	Muestra 8 (atrio)	4 (capilla)	6 (capilla)
	20 cm	70 cm	80 cm	40 cm	60 cm
Elemento			%		
Na	0.88	0.81	0.76	0.70	0.73
Mg	1.33	1.33	1.75	1.66	1.49
Al	13.07	12.44	11.92	12.56	12.14
Si	50.62	51.04	48.74	48.56	47.99
P	0.82	0.98	1.17	0.67	1.11
K	4.58	5.06	4.81	5.38	5.40
Ca	8.07	7.27	9.55	9.55	10.27
Ti	1.44	1.82	1.38	1.33	1.72
Fe	13.17	13.60	11.84	12.61	13.05
Cu	3.27	3.13	5.15	3.86	3.62
Zn	2.73	2.52	2.94	3.12	2.48
Ca/P	9.84	7.41	8.16	14.25	9.25

## 5. Elementos químicos del hueso

Con la finalidad de entender mejor los procesos de la alteración química del hueso se utilizaron análisis por EDS para cuantificar los elementos presentes en la muestra arqueológica. Se estudiaron por estos medios 14 huesos, utilizando un corte transversal de la diáfisis de cada uno de los huesos, y se obtuvieron lecturas, como se indicó en la metodología, de la zona externa, media e interna (Figura 26 y Cuadro 16). Aunque la intención inicial fue evaluar elementos traza, importantes en los estudios de dietas antiguas, debido a la técnica utilizada sólo fue posible cuantificar los elementos que están en cantidades mayores en el hueso y que, por lo tanto, se registran en porcentajes. Los resultados del análisis de los elementos químicos obtenidos se agruparon en el Cuadro 17.



*Figura 26.* Identificación cualitativa de elementos a partir de su espectro característico de un análisis EDS. En esta muestra de hueso arqueológico hay presencia relevante de Ca, P y Al. Estos resultados se obtuvieron para las tres zonas (externa, media, interna) de cada una de las secciones de fémur

**Cuadro 16**

Porcentajes de los elementos químicos para una muestra arqueológica. Se obtuvieron estos datos para cada una de las 14 muestras, tres lecturas para cada muestra

Elemento	Porcentaje atómico (% at)	Porcentaje en peso (%wt)
Na	0.43	0.27
Mg	0.41	0.27
Al	7.06	5.23
Si	0.25	0.20
P	26.37	22.42
S	2.84	2.50
Cl	0.35	0.34
K	0.17	0.18
Ca	61.54	67.71
Fe	0.57	0.88
Total	100.00	100.00

**Cuadro 17**  
**Porcentaje de elementos químicos en hueso a partir de análisis por EDS**

Sitio	Muestra	Zona	Elemento %								
			Na	Mg	Al	P	S	Cl	Ca	Ca/P	
Atrio	15 B	Externa	0.44	0.37	-	24.70	0.15	0.19	74.15	2.32	
		Media	0.58	0.53	-	25.73	-	-	73.16	2.19	
		Interna	0.12	0.14	-	16.03	-	0.13	83.58	4.02	
	12 B	Externa	-	0.15	0.09	15.40	-	-	59.37	2.97	
		Media	0.10	0.15	0.06	14.96	0.08	0.09	56.10	2.89	
		Interna	-	0.14	0.21	15.20	0.15	0.09	62.83	3.19	
	30 A	Externa	0.37	0.30	-	25.22	-	0.28	73.83	2.26	
		Media	0.27	0.27	5.23	22.42	2.50	0.34	67.71	2.33	
		Interna	-	0.28	1.05	19.21	-	0.24	79.22	3.18	
	4 B	Externa	0.31	0.38	-	24.66	-	0.13	74.52	2.33	
		Media	0.24	0.26	-	24.28	-	0.31	74.9	2.38	
		Interna	0.15	0.26	-	23.06	-	0.31	76.22	2.55	
	1 A	Externa	0.38	0.25	-	24.13	-	0.52	74.71	2.39	
		Media	0.30	0.34	-	24.00	0.07	0.50	74.79	2.40	
		Interna	0.27	0.35	-	24.19	-	0.35	74.84	2.39	
	2 B	Externa	0.45	0.39	-	24.31	0.09	0.17	74.40	2.36	
		Media	0.61	0.31	-	25.06	0.14	-	73.88	2.27	
		Interna	0.49	0.38	0.35	24.84	-	-	73.95	2.30	
	22 A	Externa	0.22	0.24	0.22	22.43	-	0.24	75.84	2.61	
		Media	0.23	0.25	-	22.21	-	0.34	76.44	2.65	
		Interna	0.16	0.27	-	23.72	-	0.35	74.46	2.42	
	7 B	Externa	-	0.46	-	25.06	-	-	73.56	2.26	
		Media	0.47	0.56	-	25.21	-	-	73.76	2.26	
		Interna	0.21	0.46	0.21	25.29	-	-	73.83	2.25	
	3 A	Externa	0.28	0.24	-	23.50	0.04	0.36	75.59	2.48	
		Media	0.32	0.33	0.3	23.88	0.16	0.38	74.61	2.41	
		Interna	-	0.24	-	24.32	0.07	0.41	72.81	2.31	
	Capilla	13 B	Externa	-	0.15	-	23.07	-	-	76.27	2.55
Media			0.18	0.14	-	23.41	0.02	-	76.16	2.51	
Interna			0.25	0.19	-	23.31	-	-	75.82	2.51	
44 A		Externa	0.26	0.23	-	24.40	-	-	75.11	2.37	
		Media	-	0.10	-	13.07	-	-	86.83	5.13	
		Interna	-	0.10	0.05	13.95	-	-	85.89	4.75	
51 A		Externa	0.38	0.49	-	25.32	0.42	0.47	72.52	2.21	
		Media	-	0.15	0.04	16.56	0.19	0.27	82.78	3.86	
		Interna	0.14	0.26	0.01	24.53	0.32	0.61	73.86	2.32	
35 A		Externa	0.25	0.13	-	23.06	0.54	0.46	75.57	2.53	
		Media	0.23	-	-	23.79	0.31	0.62	75.06	2.43	
		Interna	0.27	0.16	0.47	24.15	0.31	0.86	73.96	2.36	
Hueso moderno		2 R	Externa	0.34	0.25	0.15	24.20	-	-	75.06	2.16
			Media	0.13	0.14	-	20.29	-	-	79.28	2.16
			Interna	0.28	0.29	0.23	18.47	-	-	80.74	2.16

Los valores de la relación Ca/P para hueso moderno son datos teóricos reportados en otros trabajos (Pate y Brown 1985; Kyle 1986).

Para saber si algunos elementos químicos del tejido óseo estudiado tenían diferencias significativas, en cuanto a la sección del hueso analizada y por el sitio de enterramiento, se aplicó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis. Ésta indicó diferencias significativas para tres elementos químicos y para la relación Ca/P (Cuadro 18). Considerando esta prueba estadística, de acuerdo con la sección del hueso, el Na, en la zona media del corte transversal de la diáfisis, tuvo una significancia de 0.04. La concentración de este elemento fue mayor en los fémures del atrio y los de la capilla y menor en el hueso moderno, aunque en los huesos de la capilla fue menor la concentración que en los huesos del atrio. El Mg también mostró diferencias significativas de 0.01, para la zona media, con la misma tendencia que Na, lo mismo que calcio también con diferencias significativas de 0.02 en la zona media, indicando mayor proporción en los huesos arqueológicos.

La relación Ca/P también fue diferente en la zona media del hueso, mostrando una significancia de 0.03, siendo mayor la relación en los huesos arqueológicos en comparación con el hueso moderno. Para esta relación Ca/P en hueso moderno se utilizó el dato obtenido a partir de los estudios anteriores que indican un valor esperado de 2.16 para el mineral del hueso, considerando que éste no es puro, ya que hay otros elementos presentes en la hidroxapatita (Katzenberg 1984: citado Buikstra *et al.* 1989, Kyle 1986).

Por lo anterior, fue evidente la diagénesis en toda la sección del hueso analizada; es decir, si consideramos que las diferencias significativas se encuentran en la zona media, tomando en cuenta un plano transversal, quiere decir que la interacción química sucedió en toda la estructura del hueso, independientemente si se trató de tejido compacto o tejido esponjoso. Los resultados revelaron que la parte más activa químicamente fue la zona media, donde predomina hueso compacto. Por este motivo, se deben tomar con prudencia aquellas propuestas que indican que la diagénesis sucede únicamente en la superficie del hueso.

**Cuadro 18**

Prueba Kruskal-Wallis con respecto a la sección media del hueso para los tres grupos

Elemento	Grupo	Conteo	Suma - rango	Rango - promedio (ordenado)	
Na	Atrio	9	86.5	Atrio	9.6
	Capilla	4	14.5	Moderno	4.0
	Moderno	1	4.0	Capilla	3.6
Estadístico de prueba Kruskal-Wallis = 6.4					
La probabilidad es de 0.04 suponiendo una distribución ji cuadrada con 2 df.					
Mg	Atrio	9	89.5	Atrio	9.9
	Capilla	4	12.0	Moderno	3.5
	Moderno	1	3.5	Capilla	3.0
Estadístico de prueba Kruskal-Wallis = 8.6					
La probabilidad es de 0.01 suponiendo una distribución ji cuadrada con 2 df.					
Ca	Atrio	9	47	Moderno	12.0
	Capilla	4	46	Capilla	11.5
	Moderno	1	12	Atrio	5.2
Estadístico de prueba Kruskal-Wallis = 7.4					
La probabilidad es de 0.02 suponiendo una distribución ji cuadrada con 2 df.					
Ca/P	Atrio	9	58	Capilla	11.5
	Capilla	4	46	Atrio	6.4
	Moderno	1	1	Moderno	1.0
Estadístico de prueba Kruskal-Wallis = 6.6					
La probabilidad es de 0.03 suponiendo una distribución ji cuadrada con 2 df.					

En cuanto al sitio de enterramiento se encontraron diferencias significativas entre los grupos de atrio y capilla para Mg, Ca y la relación Ca/P (Cuadro 19). Los huesos del atrio y la capilla mostraron concentraciones altas de Mg en comparación con los huesos modernos. El Ca también fue más abundante en los huesos arqueológicos. La relación Ca/P fue más alta en los huesos del atrio y la capilla, en comparación con los huesos modernos.

**Cuadro 19**  
**Prueba Kruskal-Wallis con respecto al sitio de enterramiento**

Elemento	Grupo	Conteo	Suma - rango	Rango – promedio (ordenado)	
Mg	Atrio	27	706	Atrio	26.1
	Capilla	12	142.5	Moderno	18.1
	Moderno	3	54.5	Capilla	11.8
Estadístico de prueba Kruskal-Wallis = 11.5 La probabilidad es de 0.00 suponiendo una distribución ji cuadrada con 2 df.					
Ca	Atrio	27	472	Moderno	33.5
	Capilla	12	330.5	Capilla	27.5
	Moderno	3	100.5	Atrio	17.4
Estadístico de prueba Kruskal-Wallis = 8.6 La probabilidad es de 0.01 suponiendo una distribución ji cuadrada con 2 df.					
Ca/P	Atrio	27	575.5	Capilla	26.7
	Capilla	12	321.5	Atrio	21.3
	Moderno	3	6	Moderno	2
Estadístico de prueba Kruskal-Wallis = 9.8 La probabilidad es de 0.00 suponiendo una distribución ji cuadrada con 2 df.					

Anteriormente se discutió que la porosidad del hueso arqueológico indicó la pérdida de masa; y también, que el aumento de la densidad estuvo relacionado con la precipitación de compuestos presentes en el suelo. Por otra parte, los análisis químicos, por medio de EDS, indicaron que la fracción química de los huesos excavados en Los Olmos se alteró a lo largo y ancho de la sección de fémur utilizada. Esta información ayuda a explicar por qué los diferentes huesos del esqueleto se degradan en diferentes intensidades, lo que obliga a considerar que la diagénesis también sucede de forma diferencial en los distintos huesos del esqueleto; y además, por lo mostrado en las imágenes de microscopía electrónica, se muestra que también puede haber diferencias por causa de la cantidad de tejido poroso y tejido compacto.

Es evidente que algunos elementos químicos no fueron homogéneos en la misma sección del hueso, y por lo tanto su cuantificación para análisis de dietas



antiguas puede no ser tan confiable, inclusive si se trata de elementos menores, como los traza, los marcadores clásicos de dieta. Como lo señala Lambert *et al.* (1983, 1984, 1985, 1990, 1991), para estudiar dieta a partir de elementos químicos se podrían obtener medidas estandarizadas en los diferentes tipos de hueso para utilizar sólo aquellas secciones anatómicas que muestren una tendencia clara de su homogeneidad química. Los estudios diagenéticos relacionados con el tipo de tejido del hueso, que comparan costillas con huesos largos, han mostrado que durante el tiempo de enterramiento el tejido poroso de los huesos es más propenso a la diagénesis en comparación con el tejido compacto.

A partir de los análisis por medio de MEB-BV y por los estudios físicos y químicos del suelo, que más adelante se comentarán, fue indudable que los fémures arqueológicos adquirieron en su estructura cristalina carbonatos de calcio provenientes del suelo. Como ya se dijo anteriormente, la técnica de microscopía electrónica no tiene el potencial para evaluar los elementos traza y así tener más evidencia acerca de los compuestos o elementos que pueden indicar concretamente dieta. Otras técnicas hubieran requerido la destrucción total del hueso. En este sentido, para tener otro acercamiento de la condición química de la estructura cristalina del hueso, se pudo aplicar un análisis complementario de difracción de rayos X (XRD) sólo en tres muestras de hueso, dos arqueológicas y una moderna, para conocer su estructura y tratar de observar algún cambio representativo en la hidroxiapatita (Figuras 27 y 28).

Por medio de la técnica de difracción de rayos X se pudo notar modificación de la hidroxiapatita, a partir de la comparación de la intensidad de los picos, sobre todo los que se presentan a 25°, 46° y 49°. En el hueso moderno (Figura 27) los picos son más intensos y en las muestras arqueológicas (Figura 28 a, b) disminuyen. Las intensidades de los picos de las muestras arqueológicas indican la cristalinidad de la muestra y el ancho de pico más intenso en su parte media da información del tamaño de cristal. De las muestras analizadas se observa una disminución de la cristalinidad en las muestras arqueológicas, en tanto que en el tamaño de cristalito se observaron pocos cambios.

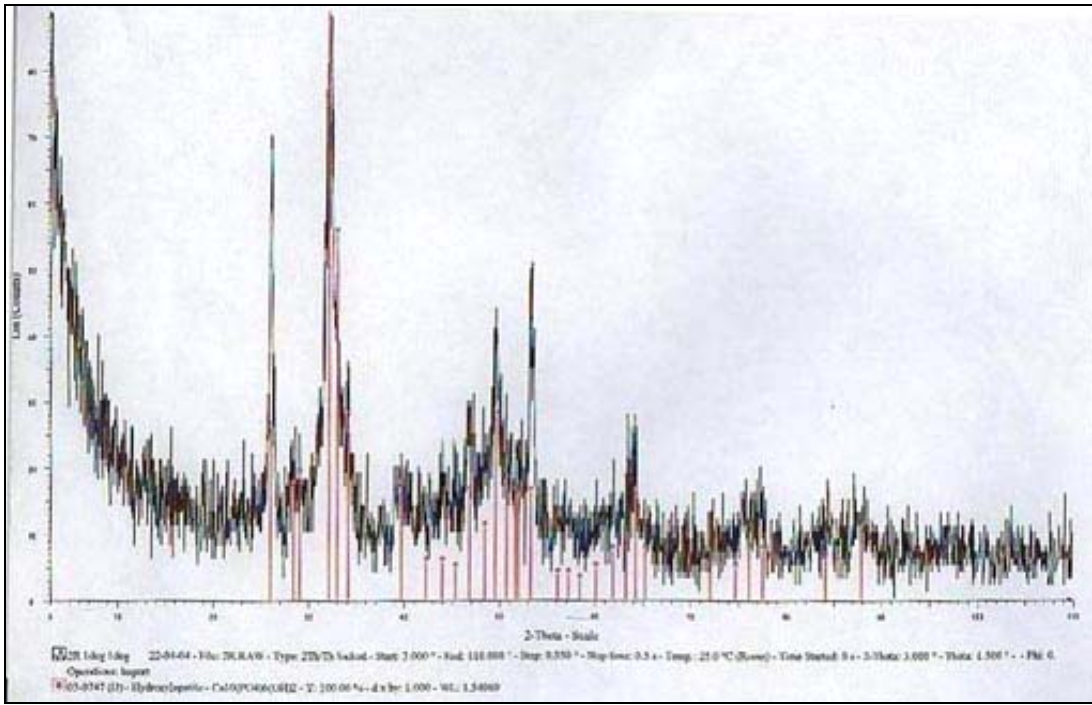


Figura 27. Difractograma de hueso moderno

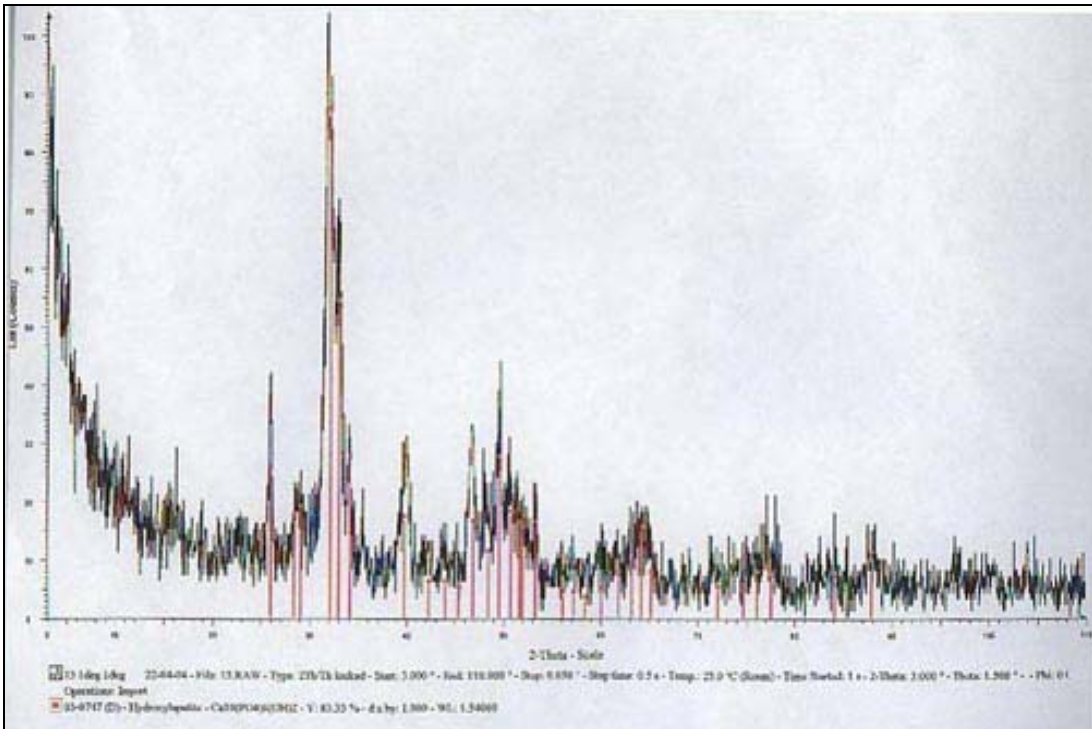


Figura 28 a. Difractograma de la diáfisis de hueso arqueológico

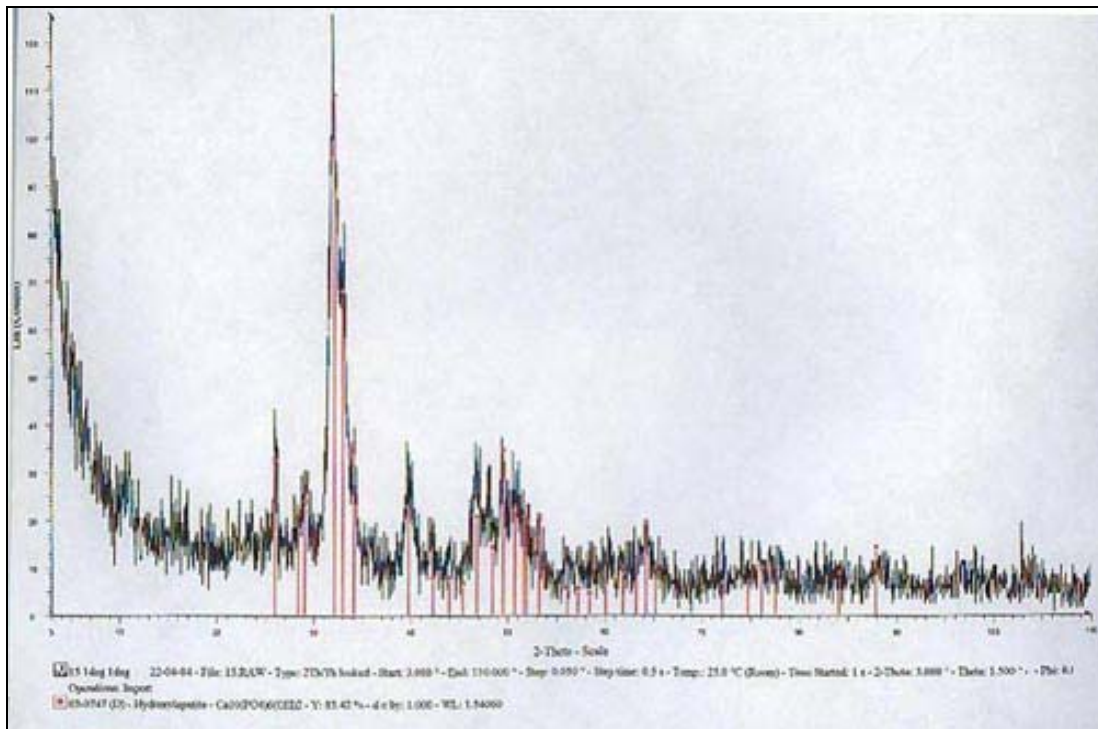


Figura 28 b. Difractograma de la diátesis de hueso arqueológico. Los picos representan la posición donde el haz de rayos X fue difractado por los planos cristalinos

Por otra parte, la técnica EDS mostró diferencias significativas sobre todo de Ca, Mg y Na. Se trató de elementos básicos que estuvieron presentes en suelos también básicos. Estos tres elementos provenientes del suelo son sales, y desde el punto de vista edafológico son minerales secundarios y abundan en zonas semiáridas, en Los Olmos generaron carbonatos de calcio y bicarbonatos de calcio. En estos suelos se estableció un equilibrio entre sus minerales, la capacidad de intercambio catiónico y el hueso. Esta relación provocó la precipitación en el hueso de dichos compuestos. Inclusive, durante la precipitación pudieron integrarse a las cavidades del hueso otros elementos, de los muchos que hay en el suelo. En el suelo hay impurezas de cualquier mineral como el Sr, que no es ajeno al suelo y pudo estar atrapado en la precipitación. Si en los suelos analizados fue abundante la precipitación de carbonatos, es seguro que algunos elementos traza penetraron en los huesos.

El suelo está conformado de partículas que son los minerales, y dentro de éstos hay minerales de la arcilla, como el caolín o la illita, entre otros, y al tener

cargas negativas pueden reaccionar químicamente con Na, Mg y Ca, formando compuestos químicos que se precipitan en el hueso. El agregado de carbonatos se debió al pH del sitio de enterramiento, en este caso se trató de valores básicos. Con el pH alcalino, y con CO<sub>2</sub> en el suelo, el Ca se removió. Aunque el carbonato de calcio es poco soluble en agua; sin embargo, con pH en promedio de 8.2, se puso parte del compuesto en solución. En la solución del suelo siempre hay muchos compuestos libres que pueden reaccionar con otros compuestos y precipitarse en el hueso.

En el suelo hay una fase sólida y una líquida. La fase sólida es la de adsorción y en la fase líquida están los compuestos químicos en solución. La fase líquida se llama, desde el punto de vista edafológico, solución del suelo. Cuando además de las dos fases, se encuentra el hueso, sucede que por causa del clima, sobre todo la lluvia, que penetra en el suelo, hay precipitación de compuestos que se quedan en el espacio poroso del hueso. La porosidad del hueso hizo fácil la precipitación de fosfato de calcio (CaPO<sub>4</sub>) y carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), provocando el aumento de su densidad. Estos compuestos se precipitaron de manera amorfa, sin estar relacionados con la hidroxiapatita del hueso, sino como un objeto extraño a sus cristales.

Las diferencias significativas en el aumento de la relación Ca/P indicaron que el Ca se incrementó en las muestras arqueológicas debido a que el CaCO<sub>3</sub> penetró en los espacios porosos del hueso por precipitación, aunque también pudo suceder por sustitución y recristalización. Los mecanismos encargados de provocar el agregado de los compuestos en el hueso también fueron consecuencia de la carbonatación, porque como el agua no es pura sino que tiene bióxido de carbono disuelto, los hidrógenos reaccionan rápidamente con otros. El carbonato del suelo se precipitó en los espacios del hueso, ya que también se mezcló con el carbonato del propio hueso.

Es un hecho que el carbonato del suelo es trascendente en la diagénesis del hueso; sobre todo, tomando en cuenta que hay diferencias de precipitación de compuestos dependiendo de los dos diferentes tejidos del hueso, esponjoso y compacto. Los huesos con grandes cantidades de tejido esponjoso, como sucede

con las epífisis de huesos largos, las vértebras o las costillas de un esqueleto, son más propensos a la precipitación de carbonatos de calcio, y de otros compuestos presentes en la solución del suelo, por causa de los poros grandes del hueso.

Si deseamos estudiar patrones dietarios de poblaciones antiguas, es necesario considerar que la diagénesis sucede en todo el hueso, aunque en algunas zonas puede ser más severa que en otras.

Finalmente, es necesario remarcar que la relación del pH de la solución del suelo con las reacciones químicas que puedan suceder, se debe a la presencia de bióxido de carbono que hay en todos los ambientes. Por este motivo, las variantes del flujo del agua del sitio influyen en la pérdida del mineral del hueso, sobre todo dependiendo de la capacidad de intercambio catiónico del suelo, que tiene relación con el pH, porque los desequilibrios químicos alrededor del hueso pueden provocar alteración más severa aunada a los procesos de lixiviación. En Los Olmos, la fluctuación del contexto de mojado a seco, causado por las texturas arenosas, así lo indicó; el agua humedeció los huesos, provocó reacciones químicas, y después de la temporada de lluvia el agua no quedó anegada sino que se filtró al drenaje interno y además se evaporó rápidamente. Hubo disolución mineral, aunque no tan severa, y en consecuencia se notó aumento de la porosidad. Claramente, la cantidad de agua del suelo del lugar de enterramiento tuvo mucha relación con el estado del hueso al momento de su excavación, porque las reacciones químicas dependen de la presencia o ausencia de agua.

## 6. Implicaciones de la diagénesis en la investigación paleodietaria

En el presente trabajo notamos que los elementos del hueso no fueron homogéneos para las tres secciones analizadas transversalmente en la diáfisis de los fémures, y también se encontró un aumento en la relación Ca/P como consecuencia de agregados de Ca en el tejido óseo provenientes del suelo. Las variaciones de elementos químicos en los huesos antiguos se registran en muchos trabajos a lo largo de 30 años, y en los últimos 15 años como parte del problema que implica hacer estudios de dietas antiguas.

El aumento de calcio en el hueso es importante sobre todo porque este elemento tiene relación con Sr, Mg y Na; es decir, la afinidad química que hay entre Sr y Ca genera incertidumbre en los análisis de dieta porque el Sr puede ingresar al hueso por medio de la precipitación de Ca. “El estroncio, y carbonato entran a la superficie cristalina. Dentro del cristal, iones divalentes de Sr, Pb y Mg pueden sustituirse por calcio, y el  $\text{CO}_3^{2-}$  se sustituye por  $\text{PO}_4^{3-}$ ” (Buikstra *et al.* 1989: 170).

El uso de niveles de Sr en los huesos humanos arqueológicos como un medio para estimar las características de la paleodieta, constituye una de las aplicaciones antropológicas más antiguas de los análisis químicos del tejido óseo. Los suelos disponen de abundantes depósitos de estroncio y las plantas lo absorben con facilidad en conjunto con el Ca. Debido a la presencia de Sr en el suelo, siempre es necesario valorar los efectos diagenéticos del hueso.

Por lo notado aquí, el contenido de Ca en el hueso puede tener fuertes implicaciones para las interpretaciones paleodietarias. El Sr en el hueso podría interpretarse también en función de la cantidad de Ca en el mismo hueso, siempre y cuando se pueda tener un control diagenético del Ca.

El análisis de Ca y, en consecuencia, de Sr, pero además, las cuantificaciones de otros elementos en los huesos, presenta ciertas dificultades; porque en última instancia muchos elementos se derivan del suelo sobre el que actúa el primer agente de la cadena trófica, las plantas; por lo cual, es posible que las variaciones en el contenido de este elemento puedan ser significativas.

Claramente, la química del hueso puede modificarse por procesos diagenéticos *post mortem*. En los suelos de Los Olmos, los valores altos de sodio, magnesio y calcio indicaron que los compuestos extraños en el hueso probablemente se debieron a la precipitación de esos elementos en forma de sales, principalmente de carbonato de Ca. El Fe y el Al, encontrados en mínimos porcentajes en algunas muestras, mostraron una inclusión de material de origen geológico.

Una variedad de elementos químicos se han empleado en los análisis de la composición de los huesos antiguos con propósitos paleodietarios –Ca, Na, Sr,

Cu, Fe, Mn, Mg, Zn, Al, Fe y Ba, entre otros. En algunos casos, el estudio de varios elementos ha contribuido al conocimiento de diferencias en el acceso y consumo de recursos alimenticios entre los distintos niveles sociales de una población. Como ciertos elementos forman parte del hueso sustituyendo al calcio, algunos autores utilizan la relación Sr/Ca, Ba/Ca y Mg/Ca para determinar dieta. Otros investigadores emplearon la cantidad absoluta de estos elementos en el hueso (Schoeninger 1979).

La información que aportan los elementos químicos del hueso a la antropología física deben obtenerse a partir de la valoración acerca del origen de los elementos que se van a medir; es decir, si proceden del propio organismo o son producto de la diagénesis, así como por la medida de sus concentraciones.

Además, en cada estudio del hueso con fines paleodietarios se debe controlar el tamaño de la muestra y de los elementos elegidos para el estudio. Es necesario que de los elementos químicos considerados para estimaciones de paleodieta se conozca su metabolismo elemental, su vínculo con la fisiología ósea en cuanto a la absorción, la relación entre el consumo del elemento y su concentración en los huesos (particularmente en la fase inorgánica del tejido) y el nivel de separación en la cadena trófica. Las inferencias de dieta se complican por la variabilidad local de los elementos en los suelos y en las plantas, así como por la interacción de los nutrientes en el organismo.

Es necesario que los estudios diagenéticos se basen en parámetros de la química y fisiología en esqueletos modernos, exentos de procesos de enterramiento, ya que la composición química del mineral del hueso en el individuo vivo no refleja las concentraciones relativas en circulación de sus componentes químicos. Por ejemplo, la fracción de Ca absorbida desde el flujo sanguíneo es más grande que la de otros metales tales como Ba, Sr y Pb. El riñón también excreta preferencialmente estos iones a través del calcio. En contraste, una vez que el hueso entra al medio geoquímico no es objeto de manera tan grande de esta discriminación biológica en contra de elementos secundarios (Ham 1970). Por lo que, para Pate y Hutton (1988), la composición química de las fases

diagenéticas debería diferir de los valores que hay en vivo pues también reflejan la composición de la solución del suelo.

Otra razón adicional de la variación del hueso se refiere a las diferencias individuales, relativamente elevadas dentro de una población, con un coeficiente de variación entre 20 y 35% (Price *et al.* 1985, Schoeninger 1979). Las causas de esta variabilidad incluyen edad, sexo y metabolismo individual. Por ejemplo,

los niveles de estroncio en el hueso se incrementan un poco con la edad. Las concentraciones relativas de estroncio, sodio y cinc decrecen en la niñez, incrementando durante la adolescencia, y permaneciendo generalmente estables entre las edades de 20 a 50 años; además, presentan un poco incremento en individuos por encima de los 50 (Price 1989: 7).

Esto sucede porque en vida el hueso es un tejido dinámico que tiene importantes funciones. La mineralización ocurre en relación con la resorción y formación.

En antropología física, la estructura del hueso arqueológico es una de las principales fuentes de estudio para las interpretaciones paleodietarias, siempre y cuando se considere que su composición multielemental está relacionada con factores variados que afectan los dos mayores componentes del hueso: la fracción mineral y la matriz orgánica. Generalmente las investigaciones de paleodieta por análisis químico de restos óseos antiguos presenta dos vertientes: concentración de isótopos C y N en la fase orgánica del tejido (colágeno), y análisis de elementos traza y minerales de la fase inorgánica (hidroxiapatita).

Con el mismo objetivo, es fundamental que el calcio y otros elementos principales se sigan reportando en porcentajes, y que los elementos menores o traza también se sigan registrando en partes por millón. Las informaciones publicadas deben hacer más explícito si los análisis son hechos sobre el hueso completo, total, o en el hueso pulverizado; y también, como lo presentamos en este caso, seleccionar un tipo de tejido, ya sea esponjoso o compacto. No cabe duda, por la revisión bibliográfica del presente y por lo encontrado en nuestro



estudio, que el tejido poroso es más propenso a tener fuertes procesos diagenéticos, sobre todo por su estructura abierta.

Los cambios *post mortem* de la composición de elementos químicos del hueso están en función de cada contexto de enterramiento y debe tomarse en cuenta para cada caso específico. Las muestras de hueso deben reportarse en términos de la edad del sujeto. Es necesario considerar la calidad de la preservación de las osamentas. Sobre todo, hay que recordar que en los huesos muy deteriorados no es factible hacer análisis de dietas antiguas porque tuvieron procesos diagenéticos fuertes.

Es necesario incrementar los datos sobre colecciones óseas modernas. Además, serviría mucho medir los elementos químicos en el hueso en una muestra grande de esqueletos para obtener estimaciones precisas de la media y la naturaleza estadística de la distribución. Elementos esenciales como Ca, Zn, P, y otros como Ba y Sr, son relevantes en esta consideración. Diferencias entre las cantidades observadas y esperadas de estos elementos pueden proporcionar alguna indicación de la extensión de los cambios después del enterramiento. En este sentido es necesaria una estandarización adecuada y una calibración entre laboratorios.

En ocasiones hay problemas porque algunos métodos se han desarrollado en otras áreas y su aplicación en problemas antropológicos requiere el consenso internacional en cuanto a los objetivos, la sección anatómica utilizada y las unidades de medida para la interpretación de los resultados obtenidos. Por la experiencia adquirida en el presente estudio, notamos que por la variación de los elementos en las distintas zonas del hueso, es necesario que para estudios paleodietarios se utilice, como se comentó anteriormente, una sección específica del hueso e indicar si las técnicas utilizadas hicieron lecturas de elementos en superficie, en la zona intermedia o en todo el grosor del tejido óseo. Algunos autores han considerado que removiendo las capas externas de los huesos, que suponen estuvieron en contacto con el suelo del enterramiento, es suficiente para remover la contaminación; sin embargo, aquí se puso en evidencia que durante el enterramiento el hueso es afectado en toda su estructura debido al agua presente

entre los poros del suelo, lo que hace que todo el hueso esté en constante interacción química con el suelo. Por este motivo, los estudios de la química y física de los suelos del lugar excavado son necesarios para entender los mecanismos de intercambio químico ente el hueso y el suelo.

Si se pretende hacer un estudio de paleodieta en los esqueletos excavados en Los Olmos, es necesario considerar que por causa de la diagénesis, detectada en toda la estructura de la zona central de la diáfisis de los fémures, la cuantificación de elementos químicos no necesariamente puede reflejar la condición química del tejido al momento de la muerte del individuo. Los elementos químicos que son abundantes en los suelos de la comunidad de Los Olmos, donde se asentó la capilla franciscana, como Ca, Na y Mg, y que sus concentraciones en el hueso pueden servir para evaluar dieta, por estar presentes en granos y legumbres, alimentos básicos de la época prehispánica, deben interpretarse considerando que evidentemente son parte de la formación del mineral del hueso, pero que su abundancia en éste fue consecuencia de la diagénesis. La degradación de los fémures estudiados fue moderada, considerando su porosidad y densidad, aunque químicamente fue lo suficiente para dificultar las interpretaciones de dieta a partir de esta muestra.

Los análisis diagenéticos pueden apoyar las valoraciones de dietas antiguas con el objeto de aumentar nuestra comprensión de la vida de las poblaciones ya desaparecidas. Sin duda, estudiar la dieta de los grupos humanos tiene implicaciones sociales y biológicas dentro de la cultura. El examen de las prácticas alimentarias de las sociedades pasadas nos puede brindar conocimientos de su vida social y económica, así como de sus procesos de adaptación y cambios tecnológicos.

## Consideraciones finales

El propósito central de este trabajo fue medir la diagénesis de los esqueletos antiguos encontrados en el atrio y la nave de la capilla franciscana del siglo XVI, de Los Olmos, para valorar qué tanto este fenómeno podía influir en los estudios de dietas antiguas que se basan en la cuantificación de elementos químicos. La diagénesis moderada fue consecuencia de varios fenómenos interrelacionados.

El clima semiárido en Los Olmos fue el factor principal. Aunque favoreció condiciones de humedad en el contexto de enterramiento, ésta no fue suficiente para promover reacciones químicas severas entre la química de los huesos y la química del suelo. La geomorfología del sitio aminoró el paso del agua por los estratos del suelo. El drenaje superficial activo fue resultado de la escasa vegetación, la cual evitó la permanencia de agua en el sitio; por lo tanto, con menor humedad hubo menores reacciones químicas desfavorables para el hueso.

Las características físicas del suelo igualmente influyeron en la diagénesis del hueso. Las texturas arenosas provocaron que el agua de la lluvia penetrara fácilmente por los estratos, aunque también fue fácil que se evaporara debido a los macroporos producidos por estas partículas. Por otro lado, las texturas finas, como arcillas y limos, incidieron en las reacciones químicas porque favorecieron la retención de humedad. El drenaje eficiente estimuló procesos de lixiviación rápidos, causantes de la diagénesis moderada del hueso.

Respecto a la química del suelo, el pH básico afectó la hidroxiapatita del hueso como consecuencia de los compuestos químicos promovidos por los OH. El agua del suelo del enterramiento determinó la naturaleza de los iones para el intercambio químico. La producción de compuestos agresivos fue suficiente para que precipitaran en el hueso provocando aumento de su densidad. Principalmente se integraron carbonatos de calcio y bicarbonatos, compuestos provenientes del suelo por la presencia de sales de calcio, magnesio y sodio, aunque también pudo haber bicarbonatos, sulfuros y sulfatos. La presencia de estas sales solubles en el suelo se notó además a partir de la conductividad eléctrica. El agregado de

carbonatos desde el suelo y la pérdida de fósforo del hueso afectaron en el aumento de la relación Ca/P, la cual también indicó diagénesis.

La diagénesis moderada fue consecuencia del equilibrio químico entre el hueso y el suelo que redujo las reacciones químicas perjudiciales para el hueso. La capacidad de intercambio catiónico elevada así lo reflejó. La escasa precipitación del lugar impidió que se lixiviaran gran cantidad de elementos que hubieran generado poca estabilidad en el complejo de cambio, establecido por las arcillas y la materia orgánica. Por este motivo, el suelo no extrajo demasiados elementos químicos del hueso.

Los estudios edafológicos son unos de los pasos iniciales para aproximarse al estado físico y químico del tejido óseo, porque hay dos factores principales que influyen directamente en su degradación: la cantidad de agua que penetra en el entierro y el pH del suelo. En consecuencia, es necesaria la investigación de la composición física y química de los suelos para la generación de explicaciones sobre la diagénesis.

En cuanto a la porosidad y densidad ósea, fue notorio que los huesos estudiados perdieron masa durante el enterramiento a causa de las reacciones químicas. La porosidad fue resultado de la pérdida de elementos químicos y de la degradación de la fracción orgánica. Sin embargo, este parámetro diagenético no fue muy severo, ya que a pesar de que hubo disolución de minerales, los huesos mantuvieron su estructura. La densidad también indicó diagénesis y, por tanto, la evidente relación de equilibrio del hueso con su entorno.

La porosidad y densidad del hueso son dos parámetros que en el tema de la diagénesis y la paleodieta siempre deben ser considerados. Es recomendable medir la porosidad de un gran número de huesos arqueológicos de diversos ambientes, con distintos grados de alteración, utilizando diferentes regiones anatómicas, y contrastando los resultados con huesos contemporáneos que no hayan estado enterrados. Aunado con esto, es relevante contrastar la química del hueso con el análisis de la química y física del suelo, tomando en cuenta distintos ambientes, sobre todo húmedos y semiáridos.

La diagénesis ocurrió en diferentes grados en toda la sección del hueso estudiado considerando el plano transversal. La degradación sucedió tanto en el tejido esponjoso como en el tejido compacto. Ambos tipos de tejido mostraron variaciones en su composición química. Algunos elementos variaron aun en la misma sección del hueso, por lo tanto, su cuantificación orientada a estudios de paleodietas debe ser considerada. La sección ósea que permitió de manera clara detectar diagénesis, fue la zona media-interna de la diáfisis donde está el límite entre el tejido compacto y el tejido esponjoso. Por este motivo, es necesario obtener medidas estandarizadas de la química de diferentes secciones anatómicas para delimitar cuáles son más estables químicamente y, por consiguiente, más factibles de utilizar en la evaluación de dietas pasadas.

La ciencia de materiales fue una parte fundamental para este trabajo. Por medio de la microscopía electrónica de barrido, modalidad bajo vacío, se apreció el aumento de porosidad en los huesos arqueológicos. La técnica EDS permitió notar que en el suelo hubo considerables concentraciones de Na, Mg y Ca, y en el hueso se detectaron otros elementos como Al, Si y en algunos casos Fe. Fue posible notar la alteración química de la hidroxiapatita a través de difracción de rayos X, encontrándose cambios en la cristalinidad. Estudios complementarios pueden apreciar más detalladamente la alteración por disolución y reprecipitación de la hidroxiapatita, usando y obteniendo el tamaño del cristal.

Para estudios diagenéticos y de dietas antiguas es útil comparar huesos modernos con huesos arqueológicos, ver la variabilidad en un hueso único y entre tejido esponjoso y tejido compacto, tomar en cuenta la edad al momento de la muerte y considerar la química del suelo del lugar de enterramiento. También se debe recordar que por la afinidad química entre elementos, la precipitación de uno de ellos en el hueso genera la inclusión de otros que son considerados indicadores de dieta. Esto sucede con el Sr, cuya afinidad con el Ca evidencia que la precipitación de carbonatos desde el suelo puede ocasionar al mismo tiempo la precipitación del Sr.

Aunque el estudio diagenético es un asunto complejo, es necesario que forme parte de investigaciones dirigidas a evaluar dietas antiguas porque es una

manera de asegurar la procedencia biogénica de los elementos químicos que se cuantifican. Se requiere que el diagnóstico diagenético esté acompañado del estudio de la topografía local, de la vegetación, del clima y de las características físicas y químicas del suelo. El componente mineral de los suelos en los sitios arqueológicos constituye una fuente abundante de información en la diagénesis del hueso.

Este estudio nos permitió reconocer que la diagénesis es un proceso penetrante y dinámico, aunque no lineal. Es notorio que hay variación en el grado de intercambio químico entre el suelo y el hueso, y también es evidente que los modelos para el cambio diagenético no pueden aplicarse fácilmente en los diferentes contextos de enterramiento. Claramente, la diagénesis es multifactorial.

Este trabajo es una propuesta metodológica para contextualizar las osamentas en estudios de diagénesis y análisis de paleodieta. El tema aquí tratado puede ser útil, en conjunto con otros estudios antropofísicos del mismo sitio arqueológico, para aumentar el conocimiento cultural de esa población. Fue interesante analizar esta muestra osteológica debido a que deriva de individuos que formaron parte de la primera generación después de la conquista europea, la cual implicó cambios sociales, políticos y económicos que evidentemente modificaron las condiciones de vida de las siguientes generaciones.

## Bibliografía

---

Alexander, P., Mary Jean Bahret, Judith Chaves, Gary Courts y Naomi Skolky  
1992 *Biología*, Ed. Prentice Hall, México, pp. 717.

Allison, L. E., J. W. Brown y H. E. Hayward  
1980 *Diagnóstico y rehabilitación de los suelos salinos y sódicos*, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), Richards, *et al.* (eds.), Limusa, México.

Ambrose, Stanley H.  
1993 "Isotopic analysis of paleodiets: methodological and interpretive considerations", *Investigations of ancient human tissue. Chemical analyses in anthropology*, M. K. Sandford (ed), Vol. 10: 59-130, Gordon and Breach Science Publishers, EUA.

Aufderheide, A. C.  
1989 "Chemical analysis of skeletal remains", *Reconstruction of life from the skeleton*, M. Iscan y K. A. Kennedy (eds.), Alan R. Liss, Inc., New York, USA, pp. 237-260.

Aufderheide, A. C. y Rodríguez-Martín, C.  
1998 *The Cambridge Encyclopedia of Human Paleopathology*, Cambridge University Press, pp. 478.

Baraybar, J. P. y C. De la Rúa  
1997 "Reconstruction of diet with trace elements of bone at the Chalcolithic site of Pico Ramos, Basque Country, Spain", *Journal of Archaeological Science*, 24: 355-364.

Beck, L. A.  
1985 "Bivariate analysis of trace elements in bone", *Journal of Human Evolution*, 5 (14): 493-502.

Behrensmeyer, A. K.  
1991 "Terrestrial vertebrate accumulations", *Taphonomy: releasing the data locked in the fossil record*, Vol. 9 of Topics in Geobiology, P. A. Allison y D. Briggs (eds.), Plenum Press, Nueva York, pp. 291-335.

Biggs, A., C. Kapicka y L. Lundgren  
2000 *Biología. La dinámica de la vida*, Mc Graw Hill, México, pp. 737.

Black, C. A.  
1970 "Methods of soil analysis", *The series agronomy*, Part 1, Number 9, American Society of Agronomy, Inc. Publisher, Madison, Wisconsin, USD.

- Black, C. A.  
1970 "Methods of soil analysis", *The series agronomy*. Part 2, Number 9, American Society of Agronomy, Inc. Publisher, Madison, Wisconsin, USA.
- Bohn, H., B. McNeal y G.O` Connor  
1993 *Química del suelo*, Limusa, México, pp. 370.
- Brito, L.  
2000 *Análisis de la población prehispánica de Monte Alban a través del estudio de la dieta*, Tesis de doctorado (inédita), Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 423.
- Brown, A. B.  
1973 *Bone strontium content as a dietary indicator in human skeletal populations*, Tesis doctoral, Universidad de Michigan, Ann Arbor, USA.
- Buikstra, J. E., S. Frankenberg, J. B. Lambert y Li-Ang Xue  
1989 "Multiple elements: multiple expectations", *The chemistry of prehistoric human bone*, T. D. Price (ed.) Cambridge University Press. Great Britain, pp. 155-210.
- Burton, J. H.  
1996 "Trace elements in bone as paleodietary indicators", *Archaeological Chemistry, Organic, Inorganic and Biochemical Analysis*. American Chemical Society, Orna, M. V. (ed.), Washington D. C., pp. 327-333.
- Burton, J. H. y L. E. Wright  
1995 "Nonlinearity in the relationship between bone Sr/Ca diet: paleodieta implications", *American Journal of Physical Anthropology*, 96 (3): 273-282.
- Cabrera, R.  
1999 "Las prácticas funerarias de los antiguos teotihuacanos", *Prácticas funerarias en la Ciudad de los Dioses, Los enterramientos humanos en la antigua Teotihuacan*, Linda Manzanilla y Carlos Serrano (eds.), UNAM, IIA, DGAPA, México, pp. 503-539.
- Campillo, D.  
s/a *Paleopatología, Los primeros vestigios de la enfermedad*, Primera y segunda parte, Fundación Uriach 1838, Colección Histórica de Ciencias de la Salud, España, pp. 167 y 123, respectivamente.
- Crosby, A.  
2003 "La fusión de dos comidas", *Conquista y comida, Consecuencia del encuentro de dos mundos*, Janet Long (ed.), UNAM, México, 131-144.



- Díaz, S.  
2003 *Caracterización de minerales zircón para fechado geológico por trazas de fisión*, tesis Facultad de Química (inédita), Universidad Autónoma del Estado de México, pp. 108.
- Díaz, G y Jesús Arenas-Alatorre  
2003 “Microscopía electrónica de barrido y técnicas analíticas asociadas para la caracterización de electrocatalizadores y superficies de electrodos”, *Electroquímica y electrocatálisis* Vol. IIb. Técnicas de investigación aplicada a sistemas electroquímicos *in situ* y *ex situ*, Nicolás Alonso-Vante (ed.), Buenos Aires, pp. 17-74.
- Domingo, X.  
2003 “La cocina precolombina en España”, *Conquista y comida. Consecuencia del encuentro de dos mundos*, Janet Long (ed.), UNAM, México, pp. 17-29.
- Duday, H.  
1997 “Antropología biológica “de campo”, tafonomía y arqueología de la muerte”, *El cuerpo humano y su tratamiento mortuario*. E. Malvido, G. Pereira y V. Tiesler, (eds.), INAH, Colección Científica, México, pp. 91-126.
- Farquharson, M. J. y R. D. Speller  
1997 “Measuring bone mineral density in archaeological bone using energy dispersive low angle X-ray scattering techniques”, *Journal of Archaeological Science*, 24: 765-772.
- Flores, Bertha A.  
2005 *Vida, cultura y muerte en un Tlaxilacalli de la Teotlalpan. Una caracterización física y social de los pobladores de Los Reyes Tetetzontlilco, en el Altepeltl Tizayuca, durante el siglo XVI*, Tesis de licenciatura (inédita), Escuela Nacional de Antropología e Historia, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Secretaría de Educación Pública, México, pp. 269.
- Foth, H.  
1997 *Fundamentos de la ciencia del suelo*, CECSA, México, pp. 433.
- Galloway, A., P. Willey y L. Snyder  
1997 “Human bone mineral densities and survival of bone elements: a contemporary sample”, *Forensic taphonomy. The postmortem fate of human remains*, W. D. Haglund y M. H. Sorg (eds.), CRC Press, New York, pp. 295-317.
- Ganong, W.  
1986 “Control hormonal del metabolismo del calcio y fisiología del hueso”, *Fisiología médica*, El Manual Moderno, México, pp. 327-338.

- García, Enriqueta  
1973 *Modificaciones al sistema de clasificación climática de KÖPPEN*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García, Enriqueta  
1978 *Apuntes de climatología*, México, pp. 153.
- García, V.  
2003 “El pan de maíz y el pan de trigo: una lucha por el dominio del panorama alimentario urbano colonial”, *Conquista y comida. Consecuencia del encuentro de dos mundos*. Janet Long (ed.), pp. 265-282, UNAM, México.
- Gavande, A.  
1979 *Física de suelos. Principios y aplicaciones*, Limusa, México, pp. 476.
- Gómez, A.  
2000 *Evaluación del estado de conservación de restos óseos a partir del análisis osteológico y su relación con el medio físico-químico del entorno*, Tesis de licenciatura en Antropología Física (inédita), Escuela Nacional de Antropología e Historia (ENAH), INAH-SEP, México, pp. 89.
- Gordon, C. C. y J. E. Buikstra  
1981 “Soil pH, bone preservation, and sampling bias at mortuary sites”, *American Antiquity*, 46: 566-571.
- Grande, L. R.  
1984 *Métodos para análisis físicos y químicos en suelos agrícolas*, Departamento de suelos, UASLP, México.
- Greenlee, D. M.  
1996 “An electron microprobe evaluation of diagenetic alteration in archaeological”, *Archaeological chemistry. Organic, inorganic and biochemical analysis*, American Chemical Society, M. V. Orna (ed.), pp. 334-354, Washington D. C.
- Ham, A. W.  
1970 “Hueso”, *Tratado de histología*, Interamericana, México, pp. 388-475.
- Hanson, D. B. y J. E. Buikstra  
1987 “Histomorphological alteration in buried human bone from the lower Illinois valley: implications for paleodietary research”, *Journal of Archaeological Science*, 5 (14): 549-563.
- Hedges, R. E., A. R. Millard y A. Pike  
1995 “Measurements and relationships of diagenetic alteration of bone from three archaeological sites”, *Journal of Archaeological Science*, 22: 201-209.

Hedges, R. E. y A. R. Millard

1995 "Bones and groundwater: towards the modeling of diagenetic processes", *Journal of Archaeological Science*, 22: 155-164.

Hernández, M. Gabriela y Lourdes R. Couoh

2006 *Una cista funeraria del Formativo Medio en Guerrero. Perspectiva interdisciplinaria del análisis óseo*, Tesis de licenciatura (inédita), Escuela Nacional de Antropología e Historia, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Secretaría de Educación Pública, México, pp. 279.

INEGI.

1992a *Carta Vegetación*, E 14-2.

1992b *Carta Edafológica*, E14 B11.

1992c *Carta Topográfica*, E14 B11.

1992d *Carta Geológica*, E14 B11.

1992e *Carta Geológica*, E14 A19.

1992f *Carta Climáticas*, 14Q – VI.

Jackson, M. L.

1964 *Análisis químicos de suelos*, Omega, España, pp. 662.

Klepinger, L. L, J. K. Kuhn y W. S. Williams

1986 "An elemental analysis of archaeological bone from Sicily as a test of predictability of diagenetic change", *American Journal of Physical Anthropology*, 70: 325-331.

Kyle, J. H.

1986 "Effect of post-burial contamination on the concentrations of major and minor elements in human bones and teeth. The implications for paleodietary research", *Journal of Archaeological Science*, 5 (13): 403-416.

Lagunas, Z.

2000 *Manual de osteología antropológica, Vol. 1. Principios de anatomía ósea y dental*, INAH, Colección Científica, 412, México, pp. 221.

Lambert, J., S. Simpson, J. E. Buikstra y D. Hanson

1983 "Electron microprobe analysis of elemental distribution in excavated human femurs", *American Journal of Physical Anthropology*, 4 (62): 409-423.

- Lambert, J. S. Simpson, C. B. Szpunar y J. E. Buikstra  
1984 "Copper and barium as dietary discriminants: the effects of diagenesis", *Archaeometry*, 26 (2): 131-138.
- Lambert, J. B. S. Simpson, C. B. Szpunar y J. E. Buikstra  
1985 "Bone diagénesis and dietary analysis", *Journal of Human Evolution*, Num. 5 (14): 477-482.
- Lambert, J. B., J. M. Weydert, S.R. Williams y J. E. Buikstra  
1990 "Comparison of methods for the removal of diagenetic material in buried bone", *Journal of Archaeological Science*, 4 (17): 453-468.
- Lambert, J. B., L. Xue y J. E. Buikstra  
1991 "Inorganic analysis of excavated human bone after surface removal", *Journal of Archaeological Science*, 3 (18): 363-383.
- López, S. y Serrano, C.  
1974 "La alimentación en el México Prehispánico", *Antropología física época prehispánica*, Javier Romero M. (coor.), Sep/INAH, México, pp. 138-152.
- Loth, S. y M. Iscan  
1989 Morphological assessment of age in the adult: The thoracic region, *Age Markers in the Human Skeleton*, M. Iscan (ed.), pp. 105-135, Charles C. Thomas Publisher, Illinois, U.S.A.
- Lyman, R. L.  
1984 "Bone density and differential survivorship of fossil classes", *Journal of Anthropological Archaeology*, 3: 259 -299.
- Lyman, R. L.  
1994 *Vertebrate taphonomy*, Cambridge, University Press, pp. 523.
- Malgosa, A. y M. E. Subirà  
1997 "Estudio de paleodietas a través de los elementos traza. Metodología, limitaciones y aportaciones a la paleodieta", *La enfermedad en los restos humanos arqueológicos. Actualización conceptual y metodológica*, Actas del IV congreso nacional de paleopatología, M. Macías y J. Picazo (eds.), Universidad de Cádiz, España, pp. 109-123.
- Manzanilla, L. y Rocío Arrellín  
1999 "Los entierros de los túneles al este de la Pirámide del Sol: proyecto UNAM 1987-1996", *Prácticas funerarias en la Ciudad de los Dioses. Los enterramientos humanos en la antigua Teotihuacan*, Linda Manzanilla y Carlos Serrano (eds.), UNAM, IIA, DGAPA, México, pp. 427-458.

Márquez de Cantú, M.J.

1991 *Probabilidad y estadística para ciencias químico-biológicas*, Mc Graw-Hill, México, pp. 657.

Meindl, R y Owen Lovejoy

1989 "Age changes in the pelvis: Implications for paleodemography", *Age Markers in the Human Skeleton*, M. Iscan (ed.), pp. 137-168, Charles C. Thomas Publisher, Illinois, U.S.A.

Meza, M.

2001 *Condiciones de salud y nutrición de los pobladores de Tetetzontlilco en el siglo XVI*, Tesis de licenciatura (inédita), ENAH-INAH-SEP, México, pp. 120.

Nason, Alvin

1987 *Biología*, Limusa, México, pp. 726.

Nicholson, R. A.

1996 "Bone degradation, burial medium and species representation: debunking the myths, an experiment-based approach", *Journal of Archaeological Science*, 23: 513-533.

Nielsen-Marsh, C. M. y R. E. Hedges

1999 "Bone porosity and the use of mercury intrusion porosimetry in bone diagenesis studies", *Archaeometry*, 41 (1): 165-174.

Nielsen-Marsh, C. M. y R. E. Hedges

2000a "Patterns of diagenesis in bone. I: the effects of site environments", *Journal of Archaeological Science*, 27: 1139-1150.

Nielsen-Marsh, C. M. y R. E. Hedges

2000b "Patterns of diagenesis in bone. II: effects of acetic acid treatment and the removal of diagenesis  $\text{CO}_3^{2-}$ ", *Journal of Archaeological Science*, 27: 1151-1159.

Ochoa, M. A.

2002 *Dieta y estatus. Estudio comparativo de paleonutrición en La Ventilla Teotihuacan*, Tesis de doctorado (inédita), UNAM, México, pp. 135.

Ortiz, B.

1977 *Edafología*, Chapingo, México, pp. 291.

Pate, D. y K. A. Brown

1985 "The stability of bone strontium in the geochemical environment", *Journal of Human Evolution*, Num. 5, Vol. 14: 483-491.

- Pate, F. D. y J. T. Hutton  
1988 "The use of soil chemistry data to address *post-mortem* diagenesis in bone mineral", *Journal of Archaeological Science*, 15: 729-739.
- Price, T. D., M. J. Schoeninger y G. J. Armelagos  
1985 "Bone chemistry and past behavior: an overview", *Journal of Human Evolution*, 14 (5): 419-447.
- Price, T. D.  
1989 "Multi-element studies of diagenesis in prehistoric bone", *The chemistry of prehistoric human bone*, T. D. Price (ed.), Cambridge University Press, Gran Bretaña, pp. 126-154.
- Price, T., J. Blitz, J. Burton y J. Ezzo  
1992 "Diagenesis in prehistoric bone: problems and solutions", *Journal of Archaeological Science*, 5 (19): 513-529.
- Rodríguez, R.  
2004 *Paleonutrición de poblaciones extinguidas en Mesoamérica y las Antillas: Xcaret y el Occidente de Cuba*, Tesis de doctorado en antropología (inédita), INAH, México, pp. 182.
- Rodríguez, R.  
2005 "La medición de parámetros diagenéticos", *Estudios de Antropología Biológica*, 12: 997-1019.
- Rottländer, R. C. A.  
1976 "Variation in the chemical composition of bone as an indicator of climatic change", *Journal of Archaeological Science*, 1 (3): 83-88.
- Rzedowski, J.  
1994 *Vegetación de México*, Limusa, México, pp. 432.
- Sandford, M. K.  
1993 "Understanding the biogenic-diagenetic continuum: interpreting elemental concentrations of archaeological bone", *Investigations of ancient human tissue. Chemical analyses in anthropology*, M. K. Sandford (ed.), Vol. 10, pp. 3-57, Gordon and Breach Science Publishers, USA.
- Schoeninger, M. J.  
1979 "Diet and status at Chalcatzingo: some empirical and technical aspects of strontium analysis", *American Journal Physical Anthropology*, 51 (3): 295-310.
- Sillen, A.  
1989 "Diagenesis of the inorganic phase of cortical bone", *The chemistry of prehistoric human bone*, T. D. Price (ed.), pp. 211-229, Cambridge University Press, Gran Bretaña.

- Sillen, A., J. C. Sealy y N. J. Van der Merwe  
1989 "Chemistry and paleodietary research: no more easy answers", *American Antiquity*, 3 (54): 504-512.
- Sterpone, O.  
1995 *Los Olmos, Tizayuca. Proyecto de rescate arqueológico* (inédito), INAH-Hidalgo, México.
- Sterpone, O.  
1997 *Los Olmos, Tizayuca, Informe arqueológico* (inédito), INAH-Hidalgo, México.
- Talavera, J. A. y Flores, R. M.  
2002 *Informe técnico de campo sobre los trabajos de excavación arqueológica y antropofísica en la localidad de Los Olmos, municipio de Tizayuca, Estado de Hidalgo, dentro del proyecto "Geografía Histórica" (Investigación acerca del urbanismo, demografía y medioambiente en el norte de la cuenca de México y regiones periféricas)*, Temporada 2000, Archivo técnico de la Coordinación Nacional de Arqueología, INAH.
- Ubelaker, D. H.  
1989 "The estimation of age at death from immature human bone", *Age Markers in the Human Skeleton*, M. Iscan (ed.), pp. 55-70, Charles C. Thomas Publisher, Illinois, U.S.A.
- Vargas, L. y L. Casillas  
2003 "El encuentro de dos cocinas: México en el siglo XVI", *Conquista y comida. Consecuencia del encuentro de dos mundos*, Janet Long (ed.), pp. 155-168 UNAM, México.
- Villamar, E.  
2006 *Historia de los elementos traza como marcadores de paleodieta en arqueología*, Tesis de maestría (inédita), UNAM, México, pp. 121.
- Villegas, et al.  
1978 Método simplificado de análisis para clasificación granulométrica de los minerales del suelo, *Revista del Instituto de Geología* No. 2, Vol. 2, UNAM, México.
- Vivó, J. A.  
1972 *Geografía física*, Ed. Herrero, México, pp. 365.
- Walker, P. L., J. R. Johnson y P. M. Lambert  
1988 "Age and sex biases in the preservation of human skeletal remains", *American Journal of Physical Anthropology*, 76: 183-188.

White, E. M. y L. A. Hannus

1983 Chemical weathering of bone in archaeological soils, *American Antiquity*, 48 (1): 316-322.

Willey, P., A. Galloway y L. Snyder

1997 Bone mineral density and survival of elements and element portions in the bones of the crow creek massacre victims, *American Journal of Physical Anthropology*, 104 (4): 513-528.

Yacamán, M. y J. Reyes

1995 *Microscopía Electrónica. Una visión del microcosmos*, CONACYT / FCE, México, pp. 143.