



ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON ACELERADORES

LABORATORIO NACIONAL

María Esther Ortiz y Salazar
Corina Solís Rosales
Efraín Chávez Lomelí
COORDINADORES



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Nos proponemos que este libro sea el inicio de una serie de textos que vayan mostrando las diversas disciplinas en que puede incidir el laboratorio LEMA del IFUNAM y la técnica AMS (Espectrometría de Masas con Aceleradores, por sus siglas en inglés) con el objeto de mostrar su enorme potencialidad. Es también objetivo central dar a conocer las facilidades que se pueden ofrecer en el terreno de la preparación de muestras. Los primeros dos capítulos pretenden dar al lector una descripción de la infraestructura y los métodos que ya están operando en la actualidad y a partir del tercero uno a uno los diferentes temas en que se ha incursionado hasta la fecha.



ISBN: 978-607-30-0594-4



9 786073 005944

ESPECTROMETRÍA
DE MASAS CON
ACELERADORES.
LABORATORIO
NACIONAL
(LEMA)

María Esther Ortiz y Salazar
Corina Solís Rosales
Efraín Chávez Lomelí
(Coordinadores)



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Espectrometría de masas con aceleradores : Laboratorio Nacional(LEMA)
/ coordinadores María Esther Ortiz y Salazar, Corina Solís Rosales,
Efraín Chávez Lomelí. -- 1a edición. -- Ciudad de México : Univer-
sidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, 2018.
260 páginas : ilustraciones ; 28 cm.

Incluye bibliografías
ISBN 978-607-30-0594-4

1. Espectrometría de masas. 2. Espectrometría de masas con acelera-
dor. 3. Aceleradores de partículas. I. Ortiz y Salazar, María Esther,
coordinador. II. Solís Rosales, Corina, coordinador. III. Chávez Lomelí,
Efraín, coordinador. IV. Universidad Nacional Autónoma de México,
Facultad de Ciencias.

543.65-scdd22

Biblioteca Nacional de México

Esta obra fué financiada por los proyectos: PAPIIME: PE-208815 y CONACyT 280769

Espectrometría de masas con aceleradores. Laboratorio nacional (LEMA)
1ª edición, 10 de abril de 2018

© D.R. 2018. Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciudad Universitaria. Delegación Coyoacán
C.P. 04510. Ciudad de México
editoriales@ciencias.unam.mx
Plaza Prometeo: <https://tienda.fciencias.unam.mx>

ISBN: 978-607-30-0594-4

Diseño de portada: Eliete Martín del Campo Treviño
Imagen de portada: Sergei Zelensky, cortesía del Dr. Thomas Higham y el proyecto *Palaeochron*
Diseño y armado de interiores: Celia M. Ayala Escorza

Prohibida la reproducción total o parcial de la obra, por cualquier medio, sin la autorización por escrito del titular de los derechos.

Impreso y hecho en México

Prólogo

El Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA) es una de las joyas del Instituto de Física, pero también del sistema de investigación de la Universidad Nacional Autónoma de México, surgió a partir de la iniciativa de un grupo de investigadores de física experimental que, con gran visión y cosecha de las enormes posibilidades que un laboratorio de esta naturaleza abriría para toda la comunidad académica mexicana, obtuvo inmediata atención y financiamiento por parte de las dos instituciones más importantes del país dedicadas a la investigación, a la formación de nuevos científicos y a la generación de nuevos conocimientos, el CONACyT y la UNAM.

Es así que a los pocos años de surgir como una idea sumamente productiva, este proyecto se concretizó en el año 2013 al inaugurarse sus instalaciones, convirtiéndose así en el primer laboratorio en utilizar la tecnología EMA para análisis de radiocarbono en nuestro país y el primero en Latinoamérica capaz de analizar a los isótopos ^{10}Be , ^{26}Al , ^{129}I y ^{238}Pu .

Ha pasado menos de un lustro desde su apertura, y el LEMA ha demostrado ser una herramienta de invaluable utilidad para dos de las tres actividades fundamentales de nuestra Universidad, pues en él, la enseñanza y la investigación se ven enriquecidas y consolidadas gracias a un trabajo que redundará en la aplicación práctica de los conocimientos teóricos y en el empleo útil y concreto de los resultados obtenidos en sus mediciones, generado así sinergias, colaboración y conocimientos de gran relevancia tanto para el sistema de investigación de la UNAM en su conjunto, como para los beneficiarios de sus resultados.

Contenido

- 9 Introducción
María Esther Ortiz Salazar y Miguel Ángel Martínez Carrillo
- 17 Capítulo 1
La técnica de espectrometría de masas con aceleradores
Corina Solís Rosales y María Rodríguez Ceja
- 45 Capítulo 2
El separador isotópico del LEMA
*Efraín Chávez Lomelí, Arcadio Huerta Hernández, Juan Flores Alanís,
Pedro Santa-Rita Alcibia y Benito Góngora Servín*
- 71 Capítulo 3
El error estadístico asociado
Javier Aragón Navarro y Efraín Chávez Lomelí
- 83 Capítulo 4
Los fechamientos por radiocarbono y el pasado humano.
Reflexiones de un arqueólogo para arqueólogos.
Ciprian Ardelean
- 125 Capítulo 5
Carbono catorce en la contaminación ambiental
Violeta Gómez Chávez, Elba Ortiz Romero-Vargas y Corina Solís Rosales
- 151 Capítulo 6
Anillos de crecimiento, fuente de información para estudios
climáticos y de contaminación atmosférica
José Villanueva Díaz y Juan Antonio Flores Alanís

- 177 Capítulo 7
Salvamento arqueológico, datación con ^{14}C y patrimonio cultural
Miguel Ángel Martínez Carrillo, Zulema Berenice Flores Montes de Oca, Erik Nehmad Amador García, Corina Solís Rosales y María Esther Ortiz Salazar
- 191 Capítulo 8
Dataciones de radiocarbono en sedimentos marinos
Ligia Pérez-Cruz, Mariana Marca-Castillo y Jaime Urrutia-Fucugauchi
- 211 Capítulo 9
La espectrometría de masas con aceleradores en la determinación de plutonio con aplicaciones en forense nuclear
Carmen Grisel Méndez-García, Elizabeth Teresita Romero-Guzmán y Héctor Hernández-Mendoza
- 233 Capítulo 10
Dosimetría interna de plutonio: un futuro no lejano usando espectrometría de masas con aceleradores
Héctor Hernández-Mendoza, Elizabeth Teresita Romero-Guzmán y María Judith Ríos-Lugo
- 249 Capítulo 11
Aplicaciones de la espectrometría de masas con aceleradores en astrofísica nuclear
Luis Armando Acosta Sánchez, Victoria Isabel Araujo Escalona, Libertad Barrón Palos, Jorge García Ramírez y Silvia Murillo Morales

Introducción

María Esther Ortiz Salazar¹ y Miguel Ángel Martínez

La pluralidad de perspectivas en la base de la ir

podría denominarse paradigma inter

Georg

Este libro se propone como el primero de una serie que muestre las disciplinas en que incide la técnica de espectrometría de masas con aceleradores (EMA) y, por consiguiente, el Laboratorio Nacional de Espectrometría con Aceleradores (LEMA). Nuestro objetivo es mostrar el enorme potencial de la técnica y dar a conocer las facilidades que se pueden ofrecer en la preparación de muestras. Los dos primeros capítulos pretenden dar al lector una visión de la infraestructura y de los métodos que ya operan en el LEMA y, en el tercero, los diferentes temas en que se ha incursionado hasta la fecha.

Como es de esperarse, dada la diversidad de muestras para analizar, cada una presenta un problema y una solución diferentes, se debe contar con personal especializado en estas tareas. Pretendemos que este libro sirva también como información clara y veraz para la orientación vocacional de los estudiantes de las diferentes licenciaturas afines de nuestra universidad.

¹ Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México. ortiz@fisica.unam.mx

² Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. mangel@ciencia.unam.mx

Los fechamientos por radiocarbono y el pasado humano. Reflexiones de un arqueólogo para arqueólogos

Ciprian Ardelean¹

Introducción

Los fechamientos por radiocarbono (carbono catorce) han adquirido cierta celebridad, tanto entre arqueólogos como entre el público en general, durante los últimos sesenta años desde su entrada triunfante en el escenario de la praxis científica. El C-14, sepamos o no cuáles son sus reales funciones en la práctica arqueológica, cómo funciona la física detrás de ello y qué alcances y limitaciones tiene, es asumido ya por el consciente popular como algo normal y acostumbrado en la investigación arqueológica y forma parte de las pocas cosas relacionadas con nuestra disciplina científica que les son familiares a muchas de las personas que nos rodean, aunque no tengan una iniciación formal en este campo.

¿Ya lo mandaste a fechar por carbono catorce? es una pregunta que suele surgir casi automáticamente de nuestra audiencia no experta cuando contamos nuestras últimas hazañas de arqueólogos a nuestros conocidos. Pero la pregunta más importante que deberíamos hacernos es si sabemos aprovechar, dentro de nuestro quehacer cotidiano como investigadores, las fantásticas ventajas epistemológicas que nos ofrece esta técnica de medición isotópica, si sabemos cómo utilizarla en relación con nuestras problemáticas de investigación y en el

¹ Unidad Académica de Antropología, Universidad Autónoma de Zacatecas, cip_ardelean@hotmail.com; aeci000206@uaz.edu.mx

Universidad de Exeter, Reino Unido, Department of Archaeology, c.ardelean@exeter.ac.uk

marco de la interpretación/explicación de los hallazgos, y si en verdad el fechamiento por radiocarbono tiene en nuestra vida profesional la importancia que el público cree que tiene.

El presente capítulo no pretende ser, de ninguna manera, un manual de manejo y uso de fechamientos de radiocarbono para arqueólogos, y tampoco reclama el papel de síntesis comprensiva de los trabajos académicos disponibles en este campo. Los lectores deseosos de conocer los fundamentos científicos y técnicos de este procedimiento podrán leer con detenimiento los demás textos de este volumen o bien acudir al valioso libro de Walker (2005) para una muy comprensiva síntesis de los distintos métodos de fechamiento absoluto con que se cuenta en la actualidad. De hecho, el presente texto ofrece un relativo descanso de la pesadez de los trabajos académicos repletos de referencias bibliográficas. Se trata, más bien, enteramente, de la *opinión personal* del autor de este texto (una opinión basada en algunos años de experiencia), una reflexión libre sobre cómo se deberían manejar, en lo técnico, lo epistemológico y lo académico-político, los fechamientos por radiocarbono, concretamente, los obtenidos mediante su versión técnica más reciente, la espectrometría de masas con aceleradores (AMS, por sus siglas en inglés). Este capítulo se dedica especialmente a los colegas jóvenes del campo de la arqueología, sobre todo a los estudiantes de licenciatura, y representa, en su totalidad, las reflexiones de un usuario de fechas de ^{14}C en el campo de la arqueología.

La realidad de la arqueología actual en México, ya en la segunda década del siglo XXI, está lejos de atestiguar un amplio y adecuado uso de las técnicas de fechamiento mediante la medición del decaimiento de isótopos radiactivos, de los cuales, el carbono-14, volviendo a su estado original de nitrógeno, es solamente uno, el mejor conocido y más ampliamente aplicado. La duradera inercia de la arqueología tradicional, más allá de la constante discursiva a favor de las nuevas arqueologías y la interdisciplinariedad, traiciona un predominio todavía significativo de las posturas histórico-culturales y de los paradigmas generados en torno a personalidades influyentes de nuestra disciplina (cf. Ardelean y Marcías, 2016). Ante esta situación, el papel que juegan los fechamientos por radiocarbono de los materiales de origen orgánico que acompañan nuestros contextos arqueológicos es todavía limitado y con débil capacidad de involucrarse en la revisión, reconsideración y corroboración de los modelos, hipótesis y paradigmas que estamos manejando.

Al vivir y trabajar en el ámbito de la arqueología mexicana, con su diversidad de idiosincrasias y oportunidades manifiestas entre los subgremios

representados por los centros INAH, la UNAM, las universidades públicas estatales, es posible observar los siguientes aspectos metodológico-conductuales en la práctica arqueológica actual, en cuanto al manejo de los fechamientos absolutos por ^{14}C :

- a. Contrario a lo que se podría asumir por parte del público, los arqueólogos *no* suelen emplear de forma acostumbrada, extensa y constante la datación por radiocarbono en sus investigaciones. Continúa el predominio de las cronologías relativas basadas en seriaciones de artefactos y relaciones estratigráficas, mientras que las fechas absolutas por técnicas modernas tienen, cuando mucho, un papel auxiliar, sumamente limitado o nulo en la mayoría de los proyectos/regiones/sitios arqueológicos de México;
- b. La arqueología mexicana tradicional, sobre todo los proyectos auspiciados por la institución que domina este campo en nuestro país, no percibe a los fechamientos por radiocarbono como una inversión necesaria y fundamental para la cual se asignen recursos específicos. La mayoría de los proyectos arqueológicos monumentales que cuentan con cierto presupuesto gozan a menudo de suficientes recursos para el pago de amplias planillas de personal, salarios para trabajadores de las comunidades aledañas, gastos de operación y mantenimiento, gasolina para las camionetas, restauración y consolidación de monumentos, etc., pero raras veces para la realización de análisis especializados como los que aquí nos conciernen.
- c. Persiste en nuestro gremio, a menudo hasta entre los colegas más versados y experimentados en la arqueología de campo, un desconocimiento vasto sobre aspectos técnicos, metodológicos y teóricos fundamentales de los fechamientos por radiocarbono: la extracción de muestras, las clases de materiales orgánicos que se pueden someter a este tipo de estudios, el funcionamiento concreto de la técnica y los principios naturales en los cuales se basa, pero, sobre todo, un desconocimiento sobre la manera de utilizar estratégicamente, dentro del discurso arqueológico, los resultados que arroja un laboratorio de espectrometrías de masas con aceleradores, como lo es el LEMA de la Universidad Nacional Autónoma de México. Hay distintas auras que los arqueólogos le imprimieron a los resultados de C-14: algunos los ven como mágicos, una especie de numerología que llega a resolver de golpe largos debates y controversias en un campo concreto de la disciplina, o bien, para otros, que llegan a complicar o cambiar el *status quo* mantenido por décadas en torno a las cronologías relativas basadas en seriaciones cerámicas y la autoridad de personalidades académicas; algunos otros los ven como misteriosos, ignorando

los principios básicos de este procedimiento ya indispensable en una arqueología científica, incluso ostentando gran desconocimiento, en jovial tono de broma, en el sinnúmero de simposios, coloquios y congresos que los arqueólogos solemos organizar en este país a raíz de nuestra cultura de la oralidad y del informe, en detrimento de la costumbre de publicar sistemáticamente.

Ya no es un secreto para nadie, a pesar de empeñarnos en mantenerlo como secreto a voces en pro del bienestar común y de la pacífica convivencia gremial, que los arqueólogos en México han venido recibiendo, tradicionalmente, como estudiantes, una preparación carente de una dimensión científica adecuada. La arqueología como antropología fue entendida, por décadas, de forma equivocada, como una manera de enfatizar la preparación abstracta y teórica (propia más bien del antropólogo social, del etnólogo, etc.), por encima de la preparación práctica y científica multifacética. En la arqueología mexicana, lo práctico se aprende usualmente en campo, no en las aulas; y ello, de forma empírica y circunstancial. En aulas abundan las materias de teoría, de síntesis, de visiones generales y de abstracciones, mientras que el quehacer real del arqueólogo es dejado a merced de las oportunidades que el alumno pueda llegar a tener en sus prácticas en distintos proyectos.

Nunca ha sido percibida la arqueología como lo que realmente es: una ciencia forense, detectivesca. Una ciencia que reconstruye o interpreta hechos y dinámicas complejas del pasado a partir de una articulación de materiales e indicadores visibles en el presente, en el contexto arqueológico (*cf.* Binford, 1988 [1994]), tal y como un detective forense reconstruyera parte de la escena del crimen a partir de lo recuperado y documentado en el lugar de los hechos. Al carecer de una visión forense y propiamente científica de la arqueología, el arqueólogo ha cedido tradicionalmente gran parte de su trabajo a los especialistas invitados (auxiliares, colaboradores). Muchos de los egresados con preparación tradicional carecen de los conocimientos adecuados para manipular y analizar por sí mismos restos óseos humanos y animales, recuperar y analizar restos macro y microbotánicos, extraer y procesar muestras de ADN, extraer y procesar muestras para estudios paleoambientales de polen y fitolitos, hacer estudios sedimentológicos y geoarqueológicos, extraer y procesar muestras para análisis geoquímicos en pisos de ocupación, razonar sobre, extraer y procesar adecuadamente muestras para distintos procedimientos de fechamientos absolutos.

Las carreras de arqueología preparan antes que nada teóricos y especialistas en artefactos, quienes posteriormente dependerán, en muchos aspectos de su trabajo, de los especialistas que realizarán la mayor parte del trabajo analítico

que le dará forma y sentido a los contextos excavados. De este modo, la falta de preparación adecuada y completa de un joven arqueólogo en los campos científicos y técnicos necesarios para su adecuado desempeño hace que el desenlace de una investigación arqueológica completa quede siempre sujeta a la disponibilidad de especialistas, laboratorios y recursos para pagar servicios a terceros.

Este grave aspecto de percepción de la naturaleza de nuestra disciplina arqueológica, junto con el todavía más grave aspecto de la incompleta formación técnica de los arqueólogos son los principales factores que contribuyen a la poca presencia que tienen actualmente los fechamientos por ^{14}C (AMS) en la realidad cotidiana de los proyectos arqueológicos mexicanos. De allí la gran importancia y necesidad de una propuesta editorial como la que se presenta aquí, y de los encuentros entre científicos y arqueólogos como el que le dio origen al presente texto.

Mis consideraciones críticas reunidas en esta introducción pueden ser consideradas como exageradas por algunos de mis colegas que se sientan aludidos en los minuses mencionados, pero ninguno de ellos podría convencerme de que estoy equivocado. Sin embargo, la intención principal de este capítulo es indudablemente constructiva: la de mostrar, desde la perspectiva de quien ha tenido la oportunidad de colaborar estrechamente con distintos laboratorios de fechamiento, algunos de los aspectos necesarios que hay que saber para un manejo adecuado de las técnicas (e implicaciones) de los fechamientos absolutos por radiocarbono. A continuación, abordo una variada serie de aspectos que en mi opinión son importantes y deben ser conocidos por los colegas, especialmente los jóvenes estudiantes que desean adentrarse un poco más en el delicado ámbito de los muestreos para la obtención de fechas absolutas por ^{14}C y los significados de los resultados obtenidos, así como sobre la manera en que deben ser manejados los mencionados resultados.

Los materiales. Lo que fechamos

Otros colaboradores de este volumen, mucho más calificados para hablar de los aspectos meramente técnicos de la obtención de fechas a partir de medir el equilibrio relativo entre los isótopos de carbono-12 y carbono-13, por un lado, y el de carbono-14 por otro, en una muestra orgánica, exponen los alcances de esta modalidad de fechamiento absoluto, así como los tipos de material arqueológico con los que se puede realizar.

Recordemos, como punto de partida, que el fechamiento por ^{14}C se realiza sobre muestras orgánicas, principalmente procedentes de un tejido que alguna vez estuvo vivo (animal, planta o humano). Los materiales más comunes disponibles para fechamiento en nuestros contextos arqueológicos son el carbón vegetal, los huesos y dientes de animales, los huesos y dientes de seres humanos, las conchas (de moluscos y gasterópodos), pero también los restos de madera conservada, los macrorrestos de plantas, adherencias orgánicas (restos de comida) en el interior de las vasijas, las fibras vegetales tejidas en forma de distintos artefactos, etc. Como arqueólogos otorgamos una importancia primordial al contexto de los hallazgos, y de la misma manera debemos actuar en relación con la relevancia interpretativa de las muestras que escogemos para obtener fechamientos absolutos. No es suficiente que el arqueólogo entregue una muestra a un laboratorio de AMS y reciba a cambio, días o semanas después, un informe con los mágicos resultados; lo primordial para el éxito de esta colaboración fascinante entre la física y la arqueología es que el arqueólogo sepa qué significa ese resultado y la muestra de la cual derivó, en el entorno espacial y cultural del sitio arqueológico, y en el marco de las problemáticas científicas y las preguntas de investigación presentes en la base del estudio que justificó la extracción de la muestra.

Para comenzar. La obtención de la muestra

Un fechamiento radiocarbónico de un material orgánico de procedencia arqueológica destinado a otorgar una dimensión cronológica a un contexto cultural original se debe realizar sobre una muestra correctamente obtenida por los arqueólogos a cargo de la investigación, de ser posible por el director mismo del proyecto o bajo la supervisión del mismo, ya que esta será la persona responsable de las implicaciones ontológicas y epistemológicas de los resultados que se generen.

Un resultado de ^{14}C puede tener implicaciones poderosas en el marco de los acalorados debates que se suelen dar en distintos escenarios de la arqueología, variando en intensidad de acuerdo al grado de complejidad que pueda presentar uno u otro de los temas a estudiar. De este modo, el arqueólogo que llevará sobre sus hombros el peso de los debates, y que enfrentará a sus pares en las confrontaciones académicas, debe tener la seguridad, la certeza, que la muestra fue extraída de forma adecuada, que él fue testigo directo o autor de la extracción, que se cuenta con la documentación adecuada del proceso de

extracción y de la ubicación tridimensional de la muestra en la estratigrafía, que la muestra ha sido debidamente resguardada y que no ha sido alterada durante su almacenamiento. Si las implicaciones conceptuales e interpretativas del resultado del fechamiento absorben al titular del proyecto y a sus colegas a cargo en acalorados debates y en contradicciones con los paradigmas aceptados, los argumentos basados sobre la nueva fecha no pueden ser defendidos con suficiente convicción si no se cuenta con la absoluta certeza que la muestra pertenece al contexto indicado, y que su extracción y almacenamiento fueron cuidadosos.

Es necesario insistir en que el verdadero peso de una fecha absoluta por AMS no reside tanto en el resultado mismo, en el valor numérico entregado por el laboratorio, sino en la capacidad y astucia del arqueólogo para emplear ese resultado en la estructura y la articulación de argumentos aportados para sostener las hipótesis y posturas que se promueven. En este tenor, es fundamental la relación indispensable que se debe mantener entre una serie de muestras destinadas a fechamientos por radiocarbono, y las problemáticas y preguntas de investigación de un determinado proyecto. Es decir, se debe saber por adelantado qué y por qué se quiere fechar y establecer este procedimiento como uno de los objetivos metodológicos primordiales de la investigación. Ello facilitará el trabajo arqueológico en distintas direcciones: a) mantendrá una relación de coherencia entre la secuencia de muestras/resultados y la problemática del proyecto científico; b) evitará la inversión de recursos en el fechamiento de muestras con poca relevancia para la resolución de las preguntas de investigación más importantes; c) propiciará un involucramiento activo y en tiempo real por parte de los arqueólogos en la obtención, selección y documentación de las muestras; y d) producirá resultados con mayor fidelidad y credibilidad, obtenidos mediante una adecuada comunicación y retroalimentación entre el arqueólogo y el laboratorio durante el proceso de análisis. Por otro lado, también evitará que se cometan los siguientes errores graves que comprometen tanto la relevancia como la credibilidad de los resultados del fechamiento: a) enviar a fechar materiales con origen/contexto dudosos; b) fechar materiales procedentes de los trabajos de otros arqueólogos, de años anteriores, sobre muestras extraídas en situaciones desconocidas; y c) fechar materiales que han permanecido mucho tiempo en condiciones de almacenaje no propicias para su análisis mediante esta técnica de datación.

Las muestras de carbón vegetal se deben extraer con fines de fechamiento por AMS directamente en campo y en el momento en que han sido expuestas

por la excavación o el recorrido (figuras 1-6). Si se tienen previstos fechamientos por radiocarbono y el contexto ofrece indicios de ser adecuado y sin evidentes intrusiones o contaminaciones con materia orgánica externa, la cucharilla y la brocha deben detener su trabajo en el momento mismo en que saquen a la luz un fragmento de carbón cuya relevancia contextual lo califica como buen candidato para la obtención de fechamientos absolutos.

No hay mucha ciencia detrás de cómo se extrae una muestra para radiocarbono, pero se deben seguir ciertos lineamientos técnicos mínimos. Se recomienda utilizar una herramienta limpia para recuperar la muestra. No apoyo la costumbre de limpiar la cucharilla en uso con la misma tierra del estrato que contiene la muestra de carbón, ya que los componentes orgánicos del suelo/sedimento no son necesariamente compatibles con la edad de la muestra vegetal. Es preferible reservar una cucharilla, cuchara o pinzas sólo para la tarea de extraer muestras para fechamiento, limpiándolas debidamente después de cada extracción y conservarlas, por ejemplo, en una bolsa sellada en las cercanías de la excavación. El personal que hace la extracción debería usar, si es posible, guantes de latex sin talco, por lo menos en la mano que no sostiene la herramienta de extracción, sobre todo si se requiere que esa otra mano intervenga en la extracción. También se debe tener cuidado de no contaminar la muestra con la saliva, transpiración y el cabello del personal encargado del procedimiento (figuras 1, 2, 3).

Para la técnica de AMS la cantidad de material es mucho menor que para el protocolo tradicional conocido como conteo Beta o centelleo líquido. No es necesario pesar la muestra en una báscula portátil en campo; se puede hacer una estimación cuando se obtiene suficiente material para el trabajo, lo cual se puede ir aprendiendo al interactuar con los técnicos de laboratorios de espectrometría de masas, como el LEMA. Por ejemplo, un pedazo de rama carbonizada de 2 a 3 cm de largo y 0.5 cm de diámetro representa ya un ejemplar generoso para una datación por AMS y para la identificación taxonómica de la planta original. Regresando de campo, la muestra se puede pesar en nuestros gabinetes/oficinas antes de ser enviada para fechamiento, sobre todo porque los laboratorios suelen requerir este dato en sus formatos de entrega de muestras.

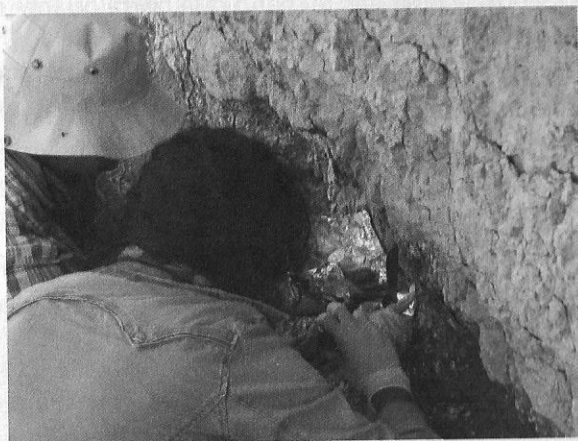


Figura 1. Estudiantes de arqueología de la Universidad Autónoma de Zacatecas extrayendo muestras para fechamiento por AMS de una lentilla de sedimento orgánico rico en fragmentos de carbón vegetal, en un perfil natural de arroyo en el sur del Estado. La extracción se realiza después de una limpieza previa del perfil expuesto, con cucharilla, para remover los primeros centímetros que pueden contener contaminación reciente. La alumna usa guantes para evitar cierta contaminación y trabaja bajo la directa supervisión del director del proyecto (el autor de este texto). El sedimento mezclado con carbón se extrae con cucharilla limpia y es almacenado en una bolsa improvisada con doble hoja de aluminio (guardada posteriormente en doble bolsa sellable) y podrá brindar información valiosa sobre el paleoambiente y una fecha de radiocarbono a partir de distintas fracciones disponibles: carbón, ácidos húmicos, contenido orgánico total (Foto: Dr. Ciprian Ardelean, 2013).

Todavía se discute sobre cómo se debería empaquetar la muestra, si en papel aluminio o directamente en bolsas de plástico de cierre hermético. Considero que los dos procedimientos son correctos, personalmente prefiero emplear siempre algo de papel aluminio, aunque algunos laboratorios argumenten que este empaque podría propiciar el desarrollo de hongos si la muestra (por ejemplo, sedimento) ha sido extraída en estado húmedo. Sin embargo, si no pasa demasiado tiempo entre la extracción y la entrega al laboratorio, ello no representa un peligro demasiado grande. Si se opta por usar aluminio, la muestra debe entrar en contacto con la cara del papel que haya estado hacia el interior del rollo, para evitar que la muestra se contamine con posibles elementos que hubiesen ensuciado el rollo por el exterior. Se recomienda extraer longitudinalmente de 30 a 40 cm de papel aluminio del rollo, doblarlo a la mitad, volteado de tal manera que hacia afuera quede el interior del rollo, y hacer una especie de bolsa o

contenedor moldeando la hoja con la mano que porta guante o usando la misma herramienta que se usará para levantar la muestra (figuras 1 y 3). Este contenedor puede ser parecido a un sobre o una bolsa cóncava, hemisférica; esta última es preferible si no queremos que el aluminio ejerza mucha presión sobre la muestra. Tal consideración es importante si tenemos la esperanza en que el laboratorio que trabajará la muestra tenga también la capacidad de identificar la taxonomía de la planta que originó el carbón y para ello queramos conservar intacta la estructura de la muestra para la microscopía. Si se opta por emplear solamente bolsas de plástico herméticas, hay que asegurarse que la muestra esté resguardada en doble o en triple bolsa, nunca en una sola; ello aumenta la resistencia del empaque durante el almacenaje y transporte, y reduce los riesgos de contaminación accidental. El contenedor elaborado en aluminio también deberá ser introducido en doble o triple bolsa hermética. Es aconsejable también, sobre todo para la recolección de muestras de madera carbonizada que conservan su estructura, emplear recipientes plásticos pequeños (figura 2).



Figura 2. Una integrante del "Proyecto Arqueológico Cazadores del Pleistoceno en el Altiplano Norte (PACPAN)"; dirigido por el autor de este capítulo, recoge pequeños fragmentos de carbón vegetal (ramas carbonizadas) de los restos de una antigua fogata descubierta en la superficie del desierto zacatecano. Utiliza mínimas medidas de seguridad (guante de látex sin talco y cucharilla limpia) y deposita las muestras en una cajita de plástico forrada con aluminio. Los fogones y fogata dejados por los antiguos cazadores-recolectores en las cuencas del norte de Zacatecas son expuestos por procesos de erosión y, a pesar de tratarse de materiales de superficie, suelen ofrecer resultados confiables al fechar su materia orgánica, tanto mediante AMS como a través de la técnica "antigua" de ^{14}C llamada comúnmente "conteo beta" (Foto: Dr. Ciprian Ardelean, 2010).

En ambas situaciones la muestra se debe etiquetar de la manera adecuada y lo más completa posible. Se puede usar información escrita con marcador permanente en el exterior de las bolsas o una etiqueta de papel/cartón en el interior de las bolsas o, todavía mejor, ambas. Es importante que la etiqueta no esté en contacto directo con la muestra, sino de preferencia introducida entre las capas de bolsas. La información contenida en la etiqueta debe ser la misma que la información escrita directamente sobre la bolsa.

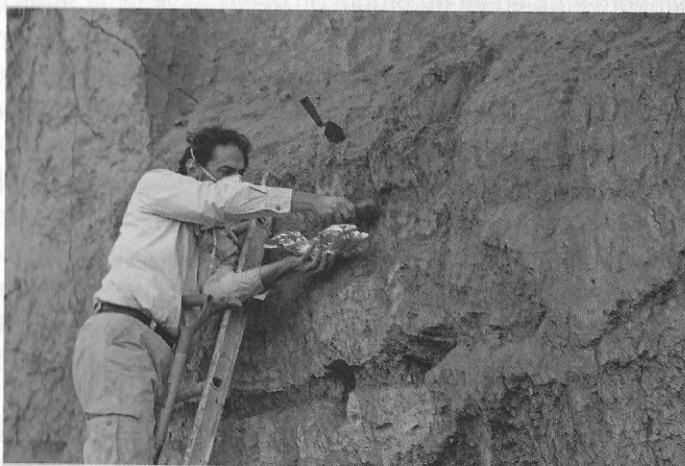


Figura 3. El fechamiento de los sedimentos a partir del muestreo cuidadoso de perfiles naturales o excavados es una práctica importante en la arqueología moderna, crucial para los estudios geo-arqueológicos y paleoambientales, capaz de poner orden en el entendimiento de los procesos de deposición y erosión en un sitio arqueológico y para ofrecer marcos cronológicos para las investigaciones interdisciplinarias. Sean naturales o expuestos por excavaciones controladas, los perfiles siempre deben ser “refrescados” antes de ser muestreados, raspando en profundidad la superficie vertical de arriba hacia abajo con cucharillas o palas. No sólo la protección de la muestra es importante; el uso de cubrebocas es importante para evitar inhalar el polvo producido. Aquí, el autor extrayendo muestras de un estrato orgánico en la localidad de Ojo de Agua, Zacatecas (Foto: Paola Moulinié, 2014).

¿Qué tipo de datos debe contener la etiqueta de una muestra para fechamiento? En primer lugar, el nombre del sitio arqueológico y la fecha de recolección de la muestra. La fecha es sumamente importante, tanto para fines internos de registro del proyecto mismo como para orientar al laboratorio sobre el lapso de

tiempo transcurrido entre la recolección de la muestra y su ingreso como orden de trabajo, después el número interno de muestra. Cada proyecto debe establecer algún código o clave para numerar sus propias muestras, independientemente de la clave que ésta va a recibir por parte del laboratorio. Ello es fundamental para saber qué muestras propias (de cada sitio, de cada excavación) corresponden a cuales claves emitidas por distintos laboratorios. Se recomienda que el número interno de muestra contenga un mínimo de información contextual que facilite su ubicación en las realidades concretas del proyecto. Por ejemplo, el tipo de claves que personalmente empleo en mi propio proyecto se ve de la siguiente manera: SJG-X8-804-10, lo cual quiere decir: sitio San José de las Grutas, excavación 8, estrato o unidad estratigráfica 804, la muestra número 10. Así, con revisar una pluralidad de informes de fechamientos provenientes de distintos laboratorios, puedo identificar en la ficha recibida mi propia clave contextual y ubicar inmediatamente en espacio la muestra cuyo resultado se me reporta. Aparte del nombre de sitio, fecha de extracción y número interno de la muestra, es necesario agregar a la etiqueta de la muestra toda la información contextual necesaria: unidad espacial (de excavación o de recorrido), especificar si proviene de excavación o de superficie, nombre o número de rasgo (si es el caso), claves del cuadrante y subcuadrante, unidad estratigráfica y profundidad de la muestra, aclarando si la profundidad es medida desde la superficie real o desde un datum, así como, cuando ello fue documentado en tiempo real, las coordenadas o valores tridimensionales (x, y, z) del punto exacto de donde se recuperó el material a fechar. Es altamente recomendable también que se tomen suficientes fotografías de la muestra desde el momento de su aparición en el contexto y del procedimiento mismo de extracción y contar así con un acervo documental completo que permita defender mejor los resultados y disipar posibles dudas que surjan a posteriori por parte de nosotros mismos o de nuestros colegas.

Durante el proceso de una excavación es aconsejable evitar excederse en valoraciones precipitadas sobre cuáles muestras extraer en vista de ser fechadas y cuáles no, sobre todo si contamos con un presupuesto limitado. Si extraemos las muestras de carbón en tiempo real en el momento de ser descubiertas, es muy difícil anticipar el panorama general de los resultados al finalizar la excavación y saber por anticipado con cuántas contaremos y cuáles muestras tendrán mayor relevancia que otras en relación a nuestras preocupaciones y preguntas de investigación. Un fragmento de carbón pequeño descubierto en las fases iniciales del trabajo puede representar en ese momento un primer destello de esperanza de obtener fechamientos absolutos, pero, días después, otro fragmento,

con mucho mayor tamaño y con mucho mayor valor contextual (por ejemplo, parte de una fogata claramente antrópica) puede ser una mucho mejor opción para invertir nuestros recursos financieros. Por ello, se recomienda extraer todas las muestras viables que vayamos descubriendo durante el trabajo en el sitio arqueológico y mantener un detallado control y registro de las mismas en nuestra libreta de campo o en la computadora de campo. Iremos elaborando una lista detallada de todas las muestras de carbón o material fechable extraídas *in situ*, a la cual se irán agregando, a medida que surjan, los datos suplementarios que ayuden a decidir, cuáles muestras deben tener preferencia para su entrega a los laboratorios. Cierta punta de proyectil, cierto objeto cerámico o resto óseo, descubiertos minutos o días después en el mismo contexto de donde habíamos recuperado una muestra de carbón, son argumentos a favor o en contra de la preferencia que una determinada muestra tenga en la selección de nuestro primer cupo de materiales a fechar, y esta información suplementaria debe estar disponible, apuntada en nuestros registros al lado de los datos de la muestra. La decisión final sobre cuáles muestras (de las potencialmente muchas) serán elegidas para la primera o la segunda serie de fechamientos se hará en gabinete, después de concluida la exploración, con base en la relevancia contextual relativa de cada una de las opciones.

Las consideraciones de más arriba son aplicables sobre todo a cierto tipo de muestras, como fragmento de carbón vegetal o sedimentos. Pero, obviamente, no todos los materiales factibles a ser fechados de forma directa mediante AMS serán separados para tal fin cuando estemos en campo. Algunos proyectos pueden plantear el fechamiento o revisión de fechas de materiales almacenados en bodegas arqueológicas y procedentes de investigaciones pasadas. Los huesos de animales, los artefactos de hueso, las conchas, fibras vegetales y fragmentos de madera recuperados en excavaciones probablemente requieran de otro tipo de estudios y de una cuidadosa selección antes de ser destinados a la alteración o destrucción implícitas en la extracción de muestras para la obtención de fechas radiocarbónicas. Un diente humano o animal, además de ser un valioso candidato para buenos resultados por AMS, necesita de estudios especializados para obtener otro tipo de datos antes de ser parcial o totalmente destruido en un laboratorio de fechamiento. Un artefacto de hueso puede tener enormes implicaciones culturales y contextuales, y requerir prolongados estudios de otra naturaleza antes de ser escogido para brindar una fecha de radiocarbono; esta clase de objetos no pueden ser separados desde su aparición en la excavación para fines de fechamiento. Sin embargo, precisamente por situaciones como és-

tas es tan importante que el arqueólogo tenga muy claro por adelantado que si realizará fechamientos por ^{14}C a partir de sus exploraciones, ya que, de lo contrario, los descuidos en la manipulación de los especímenes afectarán la viabilidad de los resultados futuros. A menudo los estudios de gabinete posteriores a la terminación de la temporada de campo arrojan luz sobre problemáticas nuevas e hipótesis cruciales que no eran evidentes mientras estábamos excavando; es ahí cuando el fechamiento sistemático de los contextos y estratos sedimentarios se vuelve fundamental, y los especialistas volverán a estudiar los perfiles expuestos por las excavaciones con anterioridad (figura 6).

Para concluir esta sección, hay que insistir en que la responsabilidad de la preparación de la muestra para su grafitización e introducción en el acelerador de espectrometría de masas debe ser de los especialistas del laboratorio de AMS y no del arqueólogo. Por ello, es recomendable que las muestras se envíen/entreguen al laboratorio tal y como se presentan en su estado original. Es decir, si contamos con concha, huesos, dientes, artefactos de fibras vegetales y madera, es preferible llevar los especímenes en su forma original al laboratorio, no extraer nosotros mismos, con nuestros propios medios, la fracción de material que se someterá al proceso de fechamiento. Así, un hueso, un diente o un artefacto de hueso que no pueda ser destruido en su totalidad, debe ser llevado, de preferencia, por el arqueólogo al laboratorio AMS, donde los especialistas extraerán en condiciones controladas la cantidad de material necesaria para el fechamiento, en vez de que el arqueólogo lo haga por sí mismo en forma casera. Ello, porque los especialistas del laboratorio, cuidadosos en mantener la credibilidad y prestigio de su lugar de trabajo, evaluarán las mejores formas y procedimientos para obtener el material. Es importante evitar los posteriores alegatos de mala praxis o contaminación si los resultados son susceptibles de cuestionamientos por parte de la comunidad académica. Hay también excepciones, por ejemplo, si el arqueólogo tiene acceso a un laboratorio limpio, en condiciones controladas (por ejemplo, un laboratorio de genética), los colegas de este laboratorio lo pueden ayudar a extraer del hueso o del diente la cantidad suficiente de material apropiada para fechamiento por AMS en un ambiente estéril que no comprometa la pureza de la muestra, evitando el surgimiento de polémicas.

Evitar contaminación, mantener alejados a los consolidantes

El uso extenso de sustancias aplicadas sobre material orgánico arqueológico se ha vuelto una práctica demasiado acostumbrada, casi obligada e inconsciente,

en la arqueología mexicana de las últimas décadas. Arqueólogos, antropólogos físicos, biólogos y restauradores, tanto en campo como en trabajos de gabinete, se empeñaban en agregar grandes cantidades de acetato de polivinilo (Resistol) diluido en agua o, todavía peor, los famosos consolidantes orgánicos como Reconos 110 y Reconos 220, hechos a base de compuestos derivados de hueso animal. Es más que evidente que una sustancia de base orgánica destinada a recuperar la fortaleza estructural de un hueso humano o animal no puede ser benéfica para los fechamientos por radiocarbono, ya que afectaría significativamente los resultados y es difícil de eliminar una vez aplicada. De igual manera, el resistol blanco puede entorpecer el proceso de preparación de la muestra y aumentar el costo del servicio por requerir trabajos de limpieza adicionales.

Se puede entender que, en un país como México, donde la sedimentación es pobre y poco profunda en la mayoría de las regiones y los huesos sufren de considerables erosiones ambientales, y con suelos ácidos que suelen desestabilizar seriamente la matriz de los huesos, se haya vuelto común el empleo de estas sustancias para la consolidación y restauración de los especímenes arqueológicos. Sin embargo, aquí observamos nuevamente cuán importante es para un arqueólogo tener claro, desde el inicio de sus trabajos en campo, si planea o no realizar fechamientos por ^{14}C y sobre qué tipo de materiales. Un objeto orgánico (hueso, diente, madera, carbón, concha, fibras, etc.) que representa siempre un candidato potencial para fechamiento radiocarbónico no debe recibir ninguna clase de tratamiento que tenga consolidantes, ni en campo ni en laboratorio, y debe ser resguardado aparte, desde las fases incipientes de los análisis, para evitar su casi inminente baño en sustancias de restauración. En estos casos la decisión debe ser tomada cuanto antes, directamente en campo, si es posible, de común acuerdo entre el arqueólogo y los especialistas asociados (arqueozoólogo, paleontólogo, antropólogo físico), partiendo de las características intrínsecas del espécimen (grado de conservación, consideraciones taxonómicas, etc.) y de su relevancia contextual y estratigráfica para la resolución de preguntas de investigación.

En conclusión, si se desean fechas de AMS confiables, debemos mantenernos alejados de la costumbre de emplear sustancias de consolidación. Si de todas maneras se cuenta con muestras importantes e imprescindibles que ya hayan sufrido este tipo de tratamientos, se precisa comunicarle al laboratorio de fechamiento toda la información necesaria para que su personal decida sobre los procedimientos de limpieza a seguir. Sin embargo, para mantener una postura transparente y ética, a la hora de comunicar/publicar resultados de fecha-

miento de muestras de este tipo, es importante mencionar que la muestra había sido tratada con sustancias restauradoras.

... entierro fechado por carbón asociado. ¿Cuál carbón fechamos y cuál no?

Un arqueólogo no debe olvidar nunca que la esencia de una fecha de ^{14}C no reside sólo en la edad que proporciona, sino sobre todo en su relevancia contextual. Una asociación meramente estratigráfica entre una muestra orgánica y un artefacto no implica necesariamente una relación directa, causal, y la fecha obtenida no siempre refleja la edad de los materiales asociados. Muy a menudo la presencia de materia de origen orgánico puede ser intrusiva, no coetánea con el estrato al que le pertenece.

Lo que más solemos seleccionar para nuestros fechamientos directos es el carbón vegetal, restos quemados de ramas, raíces, troncos de árboles, etc. Pero ¿es acaso todo el carbón presente en el registro arqueológico relevante para los contextos culturales que deseamos ubicar en el continuum cronológico? No realmente, y una valoración consciente y cuidadosa de las particularidades de cada contexto en campo y de primera mano es fundamental para evitar graves confusiones y resultados incoherentes.

Las preguntas que debemos hacernos siempre son: ¿Por qué hay carbón en mi estrato/contexto? ¿Es normal que aparezcan fragmentos de carbón? ¿Tengo indicios de procesos de intrusión-contaminación? Tener carbón en la excavación no significa que ya tengamos un medio para fechar el estrato al que le corresponde físicamente en el momento de ser descubierto. Muchas veces, fragmentos de carbón se mueven hacia arriba y hacia abajo entre los estratos debido a la presencia de madrigueras de roedores, grietas causadas por aridez o canales dejados por raíces de árboles. Fragmentos de carbón generados en incendios naturales actuales pueden alcanzar estratos profundos, de edad prehispánica o prehistórica, debido a distintos procesos de formación-transformación. Una cuidadosa observación de las características del contexto y del entorno de la excavación nos puede ayudar a evitar la interpretación errónea del carbón, y hasta ayudarnos a decidir no extraer fragmentos de carbón como muestras para fechamiento si el contexto ostenta indicios de haber estado sujeto a contaminación. Por ejemplo, si estamos excavando en un área que muestra, en superficie o en capas superficiales, restos de incendios o de fogatas modernas, es recomendable abandonar los intentos por recuperar muestras de carbón para AMS de los estratos subyacentes, ya que resultaría imposible discernir entre carbón antiguo y carbón intrusivo y, de no actuar así, podríamos desperdiciar recursos en fechamientos que arrojen resultados falsos. En estos casos el fechamiento de huesos podría resultar mucho mejor opción.



Figura 4. El carbón vegetal derivado de la quema natural o intencional de madera es el candidato favorito por los arqueólogos para la obtención de fechamientos por "carbono catorce". Sin embargo, el contexto y la interpretación del mismo juegan un papel mucho más importante que la abundancia de materia orgánica y el entusiasmo del arqueólogo debe ser controlado por el razonamiento sobre el significado contextual. En esta imagen observamos algo muy parecido a una fogata, llena de carbón, expuesta en la esquina de una excavación, muy adentro de un estrato cultural repleto de material arqueológico (lítica, huesos). Sin embargo, se trata de un rasgo intrusivo: los restos de una raíz de árbol de mesquite de tiempos modernos que penetró profundamente en las capas arqueológicas sepultadas y se quemó de forma lenta, subterráneamente, durante un incendio controlado por los ejidatarios para limpiar el terreno. Una cuidadosa observación del contexto a lo largo del proceso de excavación evitó que cayéramos en la tentación de considerar este rasgo para el fechamiento del estrato asociado (sitio arqueológico San José de las Grutas, desierto zacatecano, foto por Ciprian Ardelean, 2011).

Es también muy común escuchar a los colegas arqueólogos comunicar fechamientos de entierros humanos cuya edad se obtuvo a partir de carbón asociado. Ahora bien, la mejor y única forma directa de fechar un entierro es aplicando la técnica directamente sobre el hueso, los dientes o los restos biológicos cremados. Si el material esquelético se muestra desprovisto de colágeno, entonces buscar alternativas, pero siempre hay que tener sumo cuidado con la interpretación del carbón asociado, porque surgen siempre las siguientes preguntas clave: ¿por qué tengo carbón en el entierro?, ¿acaso he documentado y comunicado debidamente la presencia de rasgos de combustión dentro del rasgo funerario?, ¿puedo hablar de ofrendas de materiales vegetales quemados introducidos en el momento de se-

pultar el difunto, o de una práctica de quemar materiales in situ durante el proceso funerario?; ¿cuál es la razón para que aparezca un pedazo de carbón adentro de un entierro? La asociación física en el presente entre un pedazo de planta quemada y restos humanos no garantiza de ninguna manera que se trate de elementos asociados en un mismo momento histórico. Si el entierro en cuestión no muestra atributos que expliquen la presencia de materia vegetal quemada como parte de las prácticas funerarias, no hay garantía de que el carbón fechada exprese la edad del entierro. Algunos fragmentos de carbón pueden penetrar en el momento de sepultar el cuerpo o incluso después, debido a la acción de roedores, a raíces de árboles, a grietas o incluso a la introducción, de forma accidental, de sedimentos de otras épocas que contenían material derivado de incendios naturales (figura 4).

El fechamiento de sedimentos

Como se intenta mostrar hacia el final de este texto, en el manejo e interpretación de los resultados de fechamientos por ^{14}C tiene crucial importancia la réplica (repetición) de fechamientos así como los resultados cruzados obtenidos sobre distintos tipos de materiales, y por parte de diferentes laboratorios. En este contexto resalta la importancia de fechar sedimentos y paleosuelos, nunca como único elemento a datar, sino siempre como material de apoyo destinado a corroborar y contrastar los resultados obtenidos por otras vías.

La edad de un estrato de tierra con contenido orgánico (sedimento o paleosuelo) no representa siempre la edad de los elementos que contiene (artefactos, restos óseos, etc.). Un sedimento y un paleosuelo son contextos distintos, expuestos a procesos de formación-transformación distintos, pero que en común reflejan unidades de deposición que se han constituido a lo largo de cierto tiempo, relativamente largo, y que han sufrido aditamentos sucesivos de materiales y sustancias que pueden afectar su edad aparente. Los restos de plantas y animales de su horizonte húmico aportan buena parte del contenido orgánico del estrato, pero las fluctuaciones de las aguas subterráneas también pueden aportar carbón externo, tanto desde las profundidades como desde los estratos situados por encima de la unidad que se desea fechar. Todo esto ya lo conocemos como parte de nuestra formación básica, lo importante es tener siempre presentes las variables necesarias para emplear de forma adecuada en nuestras explicaciones/interpretaciones el resultado del fechamiento de un sedimento (figura 3).

En primer lugar, no debemos basar nuestras argumentaciones solamente en las fechas obtenidas de un sedimento/paleosuelo. Es importante, cuando ello sea posible, contrastar los resultados con las fechas de otros materiales relacionados y con la edad estimada de los artefactos a partir de las cronologías relativas y seriaciones tipológicas disponibles. La manera más cautelosa de usar un fechamiento de sedimentos es como un referente, como elemento de apoyo y, sobre todo, como parte de los fechamientos de *bracketing* de un contexto situado entre, encima o debajo de sedimentos o paleosuelos. El sedimento fechado puede servir en forma importante como *terminus ante quem* y/o *terminus post quem* de un nivel de ocupación humana, pero no como único argumento cronológico disponible (figura 5). Supongamos que, como sucede muy a menudo, no disponemos de otros materiales orgánicos fechables por radiocarbono y el sedimento es lo único que podemos enviar a uno o dos laboratorios como el LEMA de la UNAM, ¿cuál sería entonces la estrategia sugerida para obtener la mejor y más sólida información cronológica de una muestra de tierra?

En primer lugar, una muestra de sedimento orgánico o de paleosuelo debería enviarse siempre a más de un laboratorio. De preferencia en el momento de extraer el sedimento en campo para este fin, separar mínimo dos muestras (del mismo lugar de la planta o del perfil) pensadas desde el principio como muestras paralelas que se repliquen entre sí. O bien, si se ha extraído una sola bolsa o un solo recipiente con tierra, el contenido puede ser dividido posteriormente, en el laboratorio, y empacado debidamente para su entrega a dos o más laboratorios. Como los resultados de fechamiento de sedimentos siempre suelen suscitar escepticismo o críticas en el gremio arqueológico, valores similares o idénticos obtenidos de dos laboratorios distintos reducen las dudas y cuestionamientos en los debates académicos.

En segundo lugar, es importante contar con fechas obtenidas de dos o tres fracciones del mismo sedimento. Algunos laboratorios, como el LEMA, pueden llegar a ofrecer esta opción *por default*, como parte de los trabajos ejecutados sobre una misma muestra, aunque esta actitud gentil y solidaria es muy escasa en el mundo del fechamiento por radiocarbono. La mayoría de los laboratorios comerciales del extranjero suelen cobrar por separado (como si se tratase de muestras distintas) el fechamiento de cada una de las fracciones. Las fracciones que se pueden separar de una muestra de tierra son: carbón pequeño que fue identificado durante el pretratamiento de la muestra en el laboratorio, los ácidos húmicos, la base soluble, restos visibles de plantas como capilares de raíces

(poco confiables ya que pueden ser intrusivas) o el contenido orgánico total (es decir, la grafitización de toda la materia orgánica disponible en la muestra entregada, el total de su contenido orgánico excluyendo los macrorrestos). Cuando no contamos con la asistencia de laboratorios universitarios comprometidos y los recursos escasean, es recomendable fechar el contenido orgánico total, cuyo resultado será más relevante que el aura de elementos intrusos presentes en los macrorrestos de plantas o los ácidos húmicos. Siempre que el dinero y los contactos académicos lo permitan, es importante obtener fechas de las distintas fracciones orgánicas de un sedimento; si los resultados de éstas coinciden entre sí dentro de un rango aceptable de error, se puede argumentar que nuestro sedimento es sano y que las fechas obtenidas son coherentes y confiables. Si además de esto podemos replicar las fechas del sedimento con las fechas de los demás elementos asociados, entonces queda muy poco lugar para la duda o los cuestionamientos sobre nuestros resultados.

También se puede adoptar otra vía para corroborar la validez de los resultados de ^{14}C de un nivel sedimentario en una excavación o en un perfil natural expuesto: comparar los resultados con aquellos obtenidos mediante técnicas muy distintas de datación directa, como por ejemplo la luminiscencia por estimulación óptica (OSL, por sus siglas en inglés) (cf. Walker, 2005; Ardelean, 2013; Ardelean y Macías, 2016). El fechamiento de sedimentos por OSL es un método relativamente novedoso y en constante auge en la arqueología y geología mundiales. Consiste en leer el reloj óptico de los granos de cuarzo en los sedimentos que contengan un mínimo porcentaje de arenas y así saber cuando fue la última vez que ese nivel estuvo en contacto con la luz solar; es decir, la época en la cual ese nivel representó la superficie del sitio (figura 7). Un empate entre las fechas por ^{14}C de los distintos componentes de un sedimento, las fechas por ^{14}C de los elementos asociados (carbón, hueso) y las fechas de OSL aseguraría el más alto grado de confiabilidad de la edad de un estrato sedimentario.

El problema de fechar conchas en arqueología

Las conchas, sobre todo las conchas marinas, no son un material confiable para obtener fechamientos fieles de los contextos arqueológicos. Personalmente recomiendo a mis colegas jóvenes y estudiantes que en su carrera profesional desarrollen actividades en contextos que brindan este tipo de material, que eviten basar sus cronologías absolutas en el fechamiento de

conchas, ya que se presentan dos problemas asociados a ello: uno cultural y otro natural. Por un lado, los humanos pueden emplear conchas de grandes moluscos marinos mucho tiempo después de que el animal ha muerto, pero su concha se ha conservado en buen estado, quizás con cientos o miles de años de diferencia entre su muerte y su empleo en un contexto cultural. Por otro lado, durante la formación de la concha de un molusco marino se incluye una gran cantidad de carbón del agua y del lecho marino, de distintas procedencias, de modo que el equilibrio entre los distintos isótopos de carbono medido por el laboratorio no reflejaría en forma objetiva la edad de la muerte del organismo y los resultados serían incorrectos. Ello no es siempre así, pero la concha es un material predispuesto a esta clase de desequilibrios, por lo que es recomendable siempre contrastar los fechamientos de conchas con el fechamiento directo de otros materiales e incluso mediante otras técnicas, distintas al radiocarbono.

Consideraciones en torno a la megafauna pleistocénica

La técnica de datación por AMS, en su estado actual y con las posibilidades de infraestructura disponibles, no puede brindar fechas para edades mayores a 43,000 o 45,000 años. Además, para esas remotas épocas, la incertidumbre o desviación estándar (el \pm que siempre le sigue a un resultado de ^{14}C expresado en años radiocarbono) es ya muy grande, de cientos o miles de años, lo que en años calendario (fecha calibrada) se traduciría en muchos miles de años de aproximación o error. Después de los cuarenta y cinco milenios de haber dejado de vivir, los materiales orgánicos han perdido todo o casi todo su contenido de isótopo de carbono-14 y no queda nada para ser medido en el acelerador sin que se requiera tiempo excesivo de medición y costos elevados. En América, estamos todavía lejos de tener indicios que esta limitación física del procedimiento afecte nuestro trabajo arqueológico, ya que la antigüedad de la presencia de humanos en el continente no llega, todavía, a tales valores cronológicos comprobados. Sin embargo, en México, la relación entre la arqueología (el estudio de culturas humanas) y la paleontología (el estudio de restos de organismos extintos en eras geológicas pasadas) es bastante confusa y muy a menudo los arqueólogos se dedican a la excavación de restos de animales (principalmente de megafauna, como los mamuts), sin importar si esos contextos cuentan o no con indicios de actividades humanas. Pero la aplastante mayoría de estos hallazgos (en los cuales se invierte mucho dinero, fuerza de trabajo, esfuerzo y propaganda en los medios de comunica-

ción) no pueden ser fechados por ^{14}C , y un contexto arqueológico (o asumido como arqueológico) que no puede ofrecer una fecha es, desde el punto de vista de las exigencias actuales de nuestra disciplina a nivel mundial, un contexto prescindible.

A menudo los restos de megafauna descubiertos en territorio mexicano no brindan por sí mismos fechas absolutas mediante análisis de radiocarbono. Ello se debe a dos causas posibles, a menudo concomitantes: por un lado, los sedimentos propios de la geología mexicana destruyen casi en su totalidad los restos óseos y los despojan de la materia orgánica fechable; por otro lado, la mayoría de los especímenes recuperados a lo largo y ancho del territorio nacional podrían ser tan antiguos (mucho más antiguos que los tradicionales de diez a doce mil años que de forma automática se le suelen vender a la prensa y al público en general siempre que una nueva defensa de elefante extinto se asoma en una obra pública), que se salen del rango de posibilidades del método del ^{14}C .

Por ello, se debe entender que los mamuts, perezosos, caballos pleistocénicos y otros atractivos animales de la Era de Hielo existieron en nuestros territorios por millones de años (el Pleistoceno comenzó hace 2.58 millones de años y concluyó hace 11,700 años; cf. Head y Gibbard, 2015) y que, por lógica y sentido común, es muy probable que la gran mayoría de los ejemplares fragmentarios o relativamente completos que podríamos tener la fortuna de hallar en campo podrían tener una edad inaccesible para cualquier medición por radiocarbono, más propicia tal vez para otros procedimientos de isótopos radiactivos, como por ejemplo las series de uranio (ej. U/Th). Antes de recibir resultados positivos de un laboratorio se debe esperar una prueba de contenido de nitrógeno (que el mismo laboratorio de AMS debe ofrecer) y de presencia de colágeno en nuestras diezmadas muestras, con el fin de estimar, a partir de los datos preliminares, si se cuenta todavía con materia orgánica y con cierto conteo de átomos de ^{14}C . Por otro lado, es recomendable también que los colegas de la disciplina prehistórica, en el marco de la arqueología mexicana no monumental, dediquen más esfuerzos a la búsqueda y entendimiento de los contextos humanos prístinos de este país (verdadero propósito de la arqueología) y menos tiempo a la mamutología generadora de más y más huesos y bultos de gran tamaño en las bodegas de los centros de investigación.

Materiales de superficie: ¿fechar o no fechar?

El fechamiento de materiales arqueológicos de superficie ciertamente conlleva una serie de riesgos y puede provocar inferencias erróneas en nuestras investigaciones. La contaminación es siempre una posibilidad, y la intrusión post-deposicional de elementos no relacionados suele presentarse con frecuencia. Sin embargo, no se excluye que los contextos de superficie ofrezcan resultados aceptables y resistentes ante las críticas. Aunque los hallazgos de superficie siempre van a portar una sombra de incertidumbre, la buena evaluación de los contextos, de la asociación de elementos y de los procesos de formación-transformación, puede ayudarnos a discernir entre contextos con potencial o sin potencial para los fechamientos por radiocarbono y garantizar resultados positivos. Así, los restos óseos expuestos en un perfil de arroyo pueden brindar buenos resultados si nuestras observaciones preliminares han establecido que su posición en la estratigrafía es confiable. Una fogata en la superficie del desierto, con carbón vegetal extraído de las capas internas de su núcleo, puede también brindar resultados de ^{14}C fidedignos si nuestras observaciones concluyen que el entorno y su asociación artefactual la califican como un buen contexto (figura 1). Sin embargo, en el caso de las muestras de superficie es todavía más importante que contemos con suficientes fechamientos cruzados y réplicas que eleven la confiabilidad de los resultados. La incongruencia entre los distintos resultados o desviaciones estándar muy altas pueden indicar contaminación y poca relevancia de las fechas.

Los fechamientos por radiocarbono como guía orientativa en los trabajos de campo

Los aspectos que acabamos de tomar en consideración en relación con los contextos con megafauna y los materiales de superficie, nos encaminan hacia otro uso fundamental que los fechamientos por ^{14}C pueden tener en la investigación arqueológica sistemática enfocada a problemas de investigación específicas: como guía cronológica durante la realización de los trabajos de campo o incluso antes de que éstos comiencen. Es cierto que los fechamientos son un servicio costoso que impacta seriamente en nuestros presupuestos, pero utilizarlos de forma oportuna nos puede, en realidad, ahorrar considerables sumas de dinero en trabajos de campo y laboratorio innecesarios.

Cuando iniciamos exploraciones en sitios o regiones nuevas solemos estar ciegos desde el punto de vista cronológico y nos es difícil saber si los hallazgos

Materiales de superficie: ¿fechar o no fechar?

El fechamiento de materiales arqueológicos de superficie ciertamente conlleva una serie de riesgos y puede provocar inferencias erróneas en nuestras investigaciones. La contaminación es siempre una posibilidad, y la intrusión post-deposicional de elementos no relacionados suele presentarse con frecuencia. Sin embargo, no se excluye que los contextos de superficie ofrezcan resultados aceptables y resistentes ante las críticas. Aunque los hallazgos de superficie siempre van a portar una sombra de incertidumbre, la buena evaluación de los contextos, de la asociación de elementos y de los procesos de formación-transformación, puede ayudarnos a discernir entre contextos con potencial o sin potencial para los fechamientos por radiocarbono y garantizar resultados positivos. Así, los restos óseos expuestos en un perfil de arroyo pueden brindar buenos resultados si nuestras observaciones preliminares han establecido que su posición en la estratigrafía es confiable. Una fogata en la superficie del desierto, con carbón vegetal extraído de las capas internas de su núcleo, puede también brindar resultados de ^{14}C fidedignos si nuestras observaciones concluyen que el entorno y su asociación artefactual la califican como un buen contexto (figura 1). Sin embargo, en el caso de las muestras de superficie es todavía más importante que contemos con suficientes fechamientos cruzados y réplicas que eleven la confiabilidad de los resultados. La incongruencia entre los distintos resultados o desviaciones estándar muy altas pueden indicar contaminación y poca relevancia de las fechas.

Los fechamientos por radiocarbono como guía orientativa en los trabajos de campo

Los aspectos que acabamos de tomar en consideración en relación con los contextos con megafauna y los materiales de superficie, nos encaminan hacia otro uso fundamental que los fechamientos por ^{14}C pueden tener en la investigación arqueológica sistemática enfocada a problemas de investigación específicas: como guía cronológica durante la realización de los trabajos de campo o incluso antes de que éstos comiencen. Es cierto que los fechamientos son un servicio costoso que impacta seriamente en nuestros presupuestos, pero utilizarlos de forma oportuna nos puede, en realidad, ahorrar considerables sumas de dinero en trabajos de campo y laboratorio innecesarios.

Cuando iniciamos exploraciones en sitios o regiones nuevas solemos estar ciegos desde el punto de vista cronológico y nos es difícil saber si los hallazgos

que estamos realizando se relacionan con lo que buscamos. Las capas culturales o naturales visibles en el perfil estratigráfico expuesto en los bancos de un arroyo, en el pozo de saqueo de una cueva o en el montículo arquitectónico afectado por obras de infraestructura no siempre nos ofrecen los indicadores arqueológicos necesarios para deducir su cronología, su filiación cultural o siquiera si se ubican en épocas de relevancia para nuestra disciplina. Un paleosuelo oscuro destacando entre niveles de carbonatos puede ser de mediados del Holoceno o quizás de fines del Pleistoceno y así representar un valioso marcador cronoestratigráfico. Un acomodo de piedras claramente cultural y algunos artefactos no diagnósticos expuestos en un perfil cortado por una máquina constructora podrían ser un contexto prehistórico o quizás mucho más reciente, del Posclásico. ¿Cómo saber si aquellos elementos o rasgos que observamos en sitios recién descubiertos presentan relevancia para nuestra investigación y para los objetivos que estamos persiguiendo? Fechándolos, antes de incluir el nuevo sitio entre nuestros candidatos a estudios más profundos. Un proyecto arqueológico no puede seguir siendo percibido como una empresa oportunista que se dedica al estudio de todo lo que sale, sino que debe seguir fielmente los temas, hipótesis y objetivos que se plantea. Si las exploraciones se desarrollan en áreas poco conocidas, entonces auxiliarse de fechamientos-guía, preliminares, es un enfoque crucial para identificar las localidades con relevancia para las metas de la investigación (figura 5).

Cuando la muestra no sirve

Después de todas estas consideraciones esperanzadoras, es también importante que como arqueólogos, estemos conscientes que la técnica de fechamiento por AMS no hace milagros cuando la muestra no provee la materia necesaria para lograr nuestros objetivos; a veces la muestra no sirve para obtener una edad.

Las tres situaciones más comunes en que ello sucede son: a) el hueso que seleccionamos para ser fechado no contiene colágeno (en absoluto o en cantidad demasiado pequeña) y no se puede hacer una medición confiable; b) de igual manera, la muestra que entregamos es demasiado pequeña, incluso para esta avanzada técnica, y el hueso, carbón o diente no produjeron, durante la fase de pretratamiento suficiente material para ser medido en el acelerador; c) el carbón que entregamos resultó no ser carbón vegetal, sino otro material cuyo aspecto nos engañó cuando lo recolectamos, como por ejemplo sucede a menudo con conglomerados arcillosos impregnados de óxido de manganeso

u otros minerales o turba. En estos casos es cuando destaca la importancia de tener alternativas para obtener edades absolutas, como por ejemplo muestras adicionales o acudir a otros métodos de fechamiento.



Figura 5. Los fechamientos por AMS son importantes también para orientarnos en la línea del tiempo, al estudiar por primera vez áreas o rasgos arqueológicos cuya edad no puede ser inferida a simple vista o en ausencia de materiales arqueológicos diagnósticos. En esta imagen, el autor cuelga a 15 m de altura sobre un precipicio en el sitio arqueo-paleontológico de Santiago Chazumba, Oaxaca (ver Viñas-Valverdú et al., 2015) para obtener muestras de sedimento orgánico asociado a un rasgo de piedras de aparente origen cultural expuesto por erosión en la pared del barranco y que, por su posición estratigráfica, parecía sugerir una edad de finales del Pleistoceno ("Era de Hielo"). Sin embargo, el resultado arrojado por el análisis de AMS (muestra núm. LEMA-509) indicó que los compuestos orgánicos del estrato tenían una edad de 2365 ± 45 RCYBP (2695-2312 calBP, 2 σ , INTCAL13), es decir del Preclásico. Aunque ello no refleje directamente la edad del rasgo y los resultados sobre ácidos húmicos son sujetos a debate, la fecha reducía la relevancia del hallazgo para la problemática de la investigación (Foto: Alejandro López Jiménez, 2015).



Figura 6. Los fechamientos por AMS y otras técnicas juegan un papel primordial en el estudio de los movimientos de los primeros humanos a través del paisaje, tanto en el "Viejo" como en el "Nuevo Mundo". Estudiar con detalle los perfiles excavados en cuevas remotas y campamentos abiertos de los antiguos cazadores-recolectores permite la obtención de las mejores muestras para fechamientos detallados y de alta resolución. En esta imagen, los doctores Thomas Higham y Katerina Douka, del Research Laboratory for Archaeology and History of Art (RLAHA) de la Universidad de Oxford, analizan un perfil para extraer muestras para fechamientos en la Cueva Chagyrshkaya, en el sur de Siberia (Foto por Sergei Zelensky, amable cortesía del Dr. Thomas Higham y el Proyecto Palaeochron).

El costo de los fechamientos por ^{14}C (AMS)

El alto costo de los fechamientos por radiocarbono (y de cualquier otra técnica cronométrica) es un tema recurrente en las conversaciones entre arqueólogos, pero también se ha transformado en una excusa fácil para evitar el empleo de estas técnicas a gran escala y de forma cotidiana, y justificar su ausencia entre nuestros objetivos metodológicos. Analizar una muestra en un laboratorio comercial en el extranjero suele costar alrededor de 600 dólares estadounidenses. México, verdadera potencia arqueológica indiscutible a nivel mundial, está quedando atrás en la calidad y el eco internacional de las investigaciones precisamente debido a la débil presencia de fechas absolutas obtenidas en años recientes a través de las técnicas más modernas y refinadas que están a nuestra disposición. La raíz del problema no reside en los costos en sí (ya que

se pueden establecer convenios, acuerdos con los laboratorios menos comerciales, universitarios y llegar a reducir el gasto total), sino en la óptica de la mayoría de los investigadores y de las instituciones que proveen los recursos. Si se replantearan las prioridades y se evitaran gastos excesivos en otros conceptos o partidas (combustible para vehículos, materiales para consolidación y albañilería, trabajadores (peones), estaciones totales caras que se emplean en una sola temporada), se podrían generar espacios presupuestales que permitan la inclusión de los fechamientos por radiocarbono entre los objetivos primordiales de las investigaciones.



Figura 7. Las fechas absolutas obtenidas mediante estudios de AMS pueden o deben ser corroboradas mediante otras técnicas (fechamientos cruzados). La datación directa de granos de cuarzo en sedimentos mediante la técnica de luminiscencia por estimulación óptica (OSL) es un complemento que gana terreno en la práctica arqueológica y una buena alternativa cuando la materia orgánica no abunda. En esta fotografía, los estudiantes de arqueología Jesús "Ciro" de la Rosa y Paola Moulinié (Universidad Autónoma de Zacatecas) clavan un tubo de PVC para la obtención de muestras para OSL en los estratos superiores de un pozo de sondeo trabajado en temporadas anteriores en el sitio de Dunas, Zacatecas. Una fecha de AMS (muestra núm. LEMA-508) sobre un paleosuelo situado inmediatamente debajo del tubo sobre el mismo perfil indicó una edad de 8840 ± 40 RCYBP ($10156-9710$ calBP, 2σ , INTCAL13; cf. Ardelean y Macías, 2016: 118-121). La función de la muestra de OSL, a analizarse en el Luminescence Lab de la Universidad de Oxford, es de corroborar la relación cronológica relativa entre los estratos y comprobar la relevancia de la edad radiocarbono (Foto: Ciprian Ardelean, 2014).

Las seriaciones cerámicas, las tipologías líticas, las disposiciones estratigráficas y las secuencias arquitectónicas son y seguirán siendo elementos clave e indispensables para nuestro estudio y entendimiento de los contextos antiguos. Sin embargo, al carecer de un programa sostenido y de un esfuerzo constante para incluir fechamientos absolutos en nuestras cadenas argumentativas, permitimos que nuestra actividad profesional se mantenga más cercana a la suposición y a la inercia paradigmática que a la ciencia propiamente dicha.

La gran importancia de la incertidumbre (la desviación estándar)

El valor numérico que un laboratorio de AMS obtiene a partir de la medición de las relaciones isotópicas en un acelerador de espectrometría de masas es una aproximación a la realidad, un valor matemático. El año radiocarbono está acompañado, como a todos nos es familiar (y como se ha explicado en otros textos de este volumen), por un margen de error, expresado a través del signo de más o menos (\pm) seguido por un número (por ejemplo: 4098 \pm 32 años radiocarbono antes del presente o RCYBP por la convención internacional en inglés). Esta es la incertidumbre o la desviación estándar. No puede haber una fecha por ^{14}C sin este necesario aditamento que nos comunica un valor de posible error que será crucial tanto para evaluar la precisión del fechamiento como para obtener el rango de años calendario o calibrados dentro de los cuales ocurrió el evento que estamos fechando.

Desde la invención de los fechamientos por ^{14}C en los años cincuenta del siglo veinte y desde el refinamiento de nuevas técnicas como el AMS, el procedimiento ha pasado por constantes perfeccionamientos. Actualmente la técnica ha alcanzado mucho mayor precisión, con mucho menos incertidumbres matemáticas (incluso para edades muy antiguas de decenas de miles de años) y, con ello, ha aumentado la exigencia del mundo académico por sobre la precisión de los resultados. De este modo, en el marco de los debates y confrontaciones académicas de la arqueología actual, ya no se aceptarían fechamientos que muestren incertidumbres mayores a ± 200 o, en los peores casos, iguales o mayores a ± 300 pero para fechas ya cercanas al límite inferior de alcance de la técnica. De hecho, a manera de regla, una fecha por AMS es considerada válida por los arqueólogos alrededor del mundo si la incertidumbre no supera con mucho más el 1% de la edad radiocarbono. Es decir, para una edad de 10,000 años radiocarbono, la desviación estándar no debería pasar de ± 100 . Colegas científicos podrían argumentar con bases sólidas que no hay fundamentos claros para des-

partir resultados que no cumplan con este criterio; sin embargo, como arqueólogos, observamos cómo en los debates más acalorados de la arqueología este criterio adquiere una relevancia enorme.

En los acalorados debates que se viven en torno a ciertos temas de investigación arqueológica, como lo es por ejemplo el poblamiento temprano de América (cf. Ardelean, 2013, 2014; Ardelean y Macías, 2016), el valor de la desviación estándar de una fecha o de un grupo de fechas puede marcar seriamente la diferencia entre ser aceptadas o ferozmente rechazadas por la comunidad académica involucrada en la polémica. El que se hayan obtenido uno o varios resultados de fechamientos por radiocarbono no es garantía alguna de que las polémicas o la incredulidad menguan; como se expone más abajo en las consideraciones finales de este texto, la diferencia la hace la articulación entre varios resultados, la astuta integración de los fechamientos en el conjunto de nuestros argumentos y, en gran medida, la solidez de los resultados reflejados en una muy baja incertidumbre, menor que ± 100 .

Al final del siguiente apartado se plantea un ejercicio de calibración, con fechas ficticias, para ilustrar la gran importancia de la incertidumbre en la transformación de una edad radiocarbono en un rango de fechas calendario (tabla 1). Pero antes de ello resultará útil aportar brevemente algunos ejemplos de la vida real en los cuales las desviaciones estándar muy altas en fechamientos llevados a cabo hace ya varios años siguen manteniendo los respectivos contextos arqueológicos en una situación problemática.

No lejos de la costa noreste de Estados Unidos, en las serranías del estado de Pennsylvania, hay un sitio arqueológico prehistórico llamado Meadowcroft Rockshelter, excavado espléndidamente durante mucho tiempo por los arqueólogos de la Universidad de Pittsburg bajo la dirección de James Adovasio. Éste ha sido el primer sitio norteamericano que ha retado, desde los años 1970 y sobre pruebas concretas, la ya difunta teoría del *Clovis-first* que había dominado por décadas la arqueología de lo temprano. A pesar de la gran estratigrafía del depósito en ese abrigo rocoso, a pesar de los artefactos descubiertos y de la larga secuencia de fechas por ^{14}C , muchos colegas mantienen escepticismo respecto a la relevancia o la solidez del caso. Las razones son muchas y no pueden ser debatidas en este espacio, pero entre ellas se sitúa en primer lugar el alto nivel de incertidumbres que se reportan para los resultados de las fases más antiguas. Por ejemplo, para el estrato cultural IIa, el más debatido, se reportan fechas absolutas sobre carbón que se ven así: $12,800 \pm 870$; $16,175 \pm 975$; $19,600 \pm 2,400$ RCYBP,

etc. (Adovasio y Pedler, 2014). Las desviaciones estándar son muy altas en relación con las expectativas actuales.

De mismo modo, en México tenemos una localidad arqueológica (ahora parcialmente desaparecida) que ha jugado siempre un papel primordial en los argumentos a favor de una ocupación humana muy antigua en el territorio nacional desde tiempos prístinos del poblamiento inicial del continente. Se trata de El Cedral, en el norte-noroeste del estado de San Luis Potosí, no muy lejos de Real de Catorce. El problema es que, además de una serie de insuficiencias en las características del contexto arqueológico reportado para el sitio, los fechamientos disponibles para el mismo tampoco cumplen con las exigencias actuales y han sido obtenidos por la técnica tradicional de centelleo líquido hace ya algunos años, sin contar con suficientes réplicas y corroboraciones adicionales. Para los supuestos contextos culturales se reportan fechas como $26,984 \pm 850$; $27,459 \pm 812$; $31,960 \pm 1590$; $33,630 \pm 2066$, etc. (De los Ríos, 2012: 296; cf. Ardelean y Macías, 2016). Nuevamente la incertidumbre es tan grande en el ambiente polémico de la arqueología prehistórica actual, que induce a dudas sobre la integridad de las muestras y la interpretación de los contextos.

La calibración. RCYBP versus CalBP

La edad radiocarbono, siempre reflejada como una edad antes del presente, no refleja una edad en años reales. Para tener una estimación más realista sobre dónde se ubican nuestros hallazgos en el continuo temporal que permita hacer comparaciones transregionales o trans o interculturales, debemos manejar nuestros resultados en su versión calibrada; es decir, en intervalos de años calendario. Un resultado de ^{14}C en bruto siempre refleja, aparentemente, un solo momento en el pasado. Pero, en realidad, cuando empleamos la calibración de la edad radiocarbónica, no debemos manejar momentos sino rangos, intervalos de edad.

Las concentraciones del isótopo ^{14}C en la atmósfera terrestre han variado a lo largo del tiempo en los últimos cincuenta milenios. Décadas de estudio de estas concentraciones han establecido una curva de calibración que oscila hacia arriba y abajo sobre el eje del tiempo de acuerdo con el aumento o disminución de los valores de ^{14}C atmosférico en cada época. La curva se actualiza y corrige periódicamente, es importante realizar las calibraciones empleando la versión más reciente. La gráfica de calibración representa un diagrama con ejes x, y, don-

de el eje horizontal (x) está representado por el continuum de tiempo en años reales, mientras el eje vertical (y) lo representa la edad radiocarbono. El momento aparente representado por la fecha en bruto intercepta la oscilante curva de los valores variables de ^{14}C atmosférico en distintos puntos y la sombra de esta intersección compleja se proyecta sobre el eje x de los años calendario a manera de un intervalo de edades. De modo que la edad real de un contexto arqueológico no se debe pensar nunca en términos de qué año es, sino de una estimación que oscila dentro de cierto rango de años con una amplitud que depende de la edad radiocarbono y de la incertidumbre o desviación estándar; se puede tratar de un rango de décadas, siglos o milenios. Cuánto más antigua sea la edad en años radiocarbono, más amplio resulta el rango de años calendario en los cuales se sitúa la fecha del evento estudiado.

El laboratorio suele entregar siempre la calibración de una fecha de ^{14}C con dos opciones de probabilidades: a un sigma ($1\sigma = 68\%$ de probabilidad) y a dos sigma ($2\sigma = 95\%$ de probabilidad). Siempre es posible observar que el rango de años en que se puede situar nuestra fecha verdadera es más angosto para una calibración a un sigma, pero la probabilidad de ser certero es menor. Por el contrario, el rango de edad calibrada es mucho más amplio (dando la errónea impresión de menos fidelidad) para dos sigmas, pero la probabilidad de tener nuestra edad verdadera dentro de ese rango es mucho mayor, casi total (95%). Por ello, es preferible manejar nuestras fechas calibradas en términos de 2σ .

Una edad radiocarbono (RCYBP) es la única que lleva el signo de más o menos y siempre se expresa como antes del presente, nunca como antes de Cristo o en otro sistema de referencias. Una edad calibrada no puede llevar el signo matemático de la incertidumbre y siempre debe ser expresada como un intervalo. Para las épocas muy antiguas (sobre todo para la prehistoria y sitios arqueológicos que se ubican más allá del alcance cronológico del Holoceno Tardío), las fechas calibradas deben ser siempre calculadas como calBP (calibrada, antes del presente). Para edades más cercanas a la actualidad (digamos, para contextos arqueológicos comprendidos entre el Preclásico mesoamericano y la época histórica), las fechas calibradas pueden ser expresadas con referencia al sistema calendario cristiano, como calBC (calibrado, antes de Cristo) o calAD (calibrado, después de Cristo o *anno domini*). El laboratorio de AMS puede ofrecer las calibraciones en cualquiera de los dos sistemas. Sin embargo, en mi opinión, la referencia BP (antes del presente) es más académica, más internacional que el sistema cristiano.

Imaginemos que contamos con dos fechas de radiocarbono, para dos contextos distintos de una misma excavación, valores numéricos que inventamos con fines ilustrativos (tabla 1). Digamos que una fecha fue obtenida hace veinte años, indicando una antigüedad de 1050 ± 500 RCYBP (años radiocarbono antes del presente) y la otra fue generada con la tecnología más reciente, mostrando una edad de 2200 ± 30 RCYBP. Como se puede notar, la primera fecha tiene un tronco de 1050 años pero una incertidumbre muy grande, de 500 años, un valor que sería inaceptable en el escenario académico actual y bajo las nuevas exigencias. La otra fecha indica una edad aparente al menos 1000 años mayor, de unos 2200 años, pero con una incertidumbre de solamente 30. Quienes estén poco iniciados en los principios del fechamiento por ^{14}C probablemente tengan la tendencia a creer que la incertidumbre de la primera fecha (± 500) indicaría un rango de edad real de entre 500 y 1500 años atrás y que la segunda estaría quizás entre 2170 y 2230 años atrás, mostrando ocupaciones no demasiado lejanas en el tiempo. Nada más equivocado.

Realicemos ahora la calibración real de estas fechas imaginarias con el software vigente en este momento, el OxCal 4.2, empleando la curva de calibración del año 2013, es decir INTCAL13 (Reimer et al., 2013). Ello se puede hacer fácilmente y en línea, en cuestión de segundos (si se cuenta con nombre de usuario y contraseña), a través de la página web del Oxford Radiocarbon Accelerator Unit (ORAU) de la Universidad de Oxford. Los resultados de la calibración mostrarán cuán fundamental es la magnitud de la incertidumbre. Al insertar los valores de la primera fecha en la ventana de captura, el software arrojó una fecha calibrada que oscila escandalosamente, a 2σ (95%), entre el año 164 calBC (antes de Cristo) y 1697 calAD (de nuestra era); es decir, un margen de error de más de 1800 años calendario, muy superior a la fecha de radiocarbono en bruto. Un resultado así sería descartado de inmediato y la fecha sería inaceptable para cualquier finalidad científica e insostenible en cualquier debate. Por el contrario, al correr la calibración de la fecha con valor mayor pero incertidumbre menor, en la de 2200 ± 30 RCYBP, observamos que la curva de calibración a 2σ (95%) sitúa nuestra edad real entre los años 366-192 calBC (antes de Cristo), en un intervalo de sólo 174 años para veintidós siglos radiocarbono, una amplitud que equivale a un 7.9% de la edad radiocarbono, lo que califica como una fecha perfecta.

Este sencillo ejemplo nos muestra que la incertidumbre que el laboratorio ofrece para la fecha de ^{14}C proporcionada es crucial para evaluar la integridad del resultado y la relevancia de la calibración. Así, los resultados de fechamien-

los por ^{14}C obtenidos hace décadas mediante el método tradicional de conteo beta (o centelleo líquido) que muestran incertidumbres inaceptables deben ser descartados como irrelevantes, y los contextos arqueológicos asociados removidos también de las listas de sitios con ocupación temprana, a excepción de que se realicen replicas de aquellos fechamientos o programas sistemáticos de redatación.

Muestra No.	Año del análisis / clave de laboratorio	Edad C-14, RCYBP	Edad calibrada (2 σ , 95%, INTCAL13)
1	1995 / ABC-123	1050 \pm 500	164 calBC - 1697 calAD
2	2016 / RCB-456	2200 \pm 30	366 - 192 calBC

Cómo presentar los resultados de los fechamientos

Presentar de forma correcta los resultados de los fechamientos por ^{14}C en nuestras comunicaciones orales (ponencias, conferencias, posters, etc.) y en nuestras publicaciones es un aspecto fundamental, de ética y profesionalismo. Sin embargo, es mucho más común de lo que podríamos imaginar que los colegas profesionistas y estudiantes publiquen/comuniquen los resultados de radiocarbono de forma errónea, confusa o incompleta. Respetar los pocos pero básicos principios necesarios para una correcta difusión de los resultados evitaría tanto confusiones en el diálogo con los colegas como complicaciones y problemas con los laboratorios.

En primer lugar, debemos especificar siempre, tanto en las conversaciones informales como sobre todo en los textos publicados, si el número que presentamos es una fecha sin calibrar (fecha radiocarbono) o una fecha calibrada (años calendario). Ello no sería necesario si constantemente empleáramos los sufijos adecuados, pero no deja de ser común que hablemos con soltura sobre 10,000 años antes del presente sin dejar en claro si ello alude a un resultado bruto de un análisis de AMS o si estamos informando la fecha en años calibrados. Tristemente, la costumbre de aclarar esta crucial dicotomía (que puede implicar miles de años de diferencia entre un valor calibrado y uno sin calibrar) no es muy evidente en la

mayoría de los trabajos arqueológicos de las décadas pasadas. Aunque se puede asumir que un número que aparezca solo ha de hacer referencia a la fecha radiocarbono, mientras que un rango de edades habría de indicar con seguridad una fecha calibrada, muy pocos colegas de la vieja escuela se preocupaban por estas convenciones. De este modo, los discursos académicos carecían de la claridad necesaria para ser comprendidos en lecturas posteriores. Es necesario agregar siempre las leyendas RCYBP (o bien ^{14}C BP o alguna otra convención aceptada) a los resultados no calibrados y el sufijo calBP (o bien calBC, calAD, según el caso) a los resultados calibrados. Se subentiende entonces que, en nuestras comparaciones inter o transregionales e inter y transculturales, no debemos comparar fechas radiocarbono con fechas calibradas o viceversa.

Una fecha radiocarbono (la fecha en bruto) es el único formato de resultados de ^{14}C que debe llevar como sufijo el famoso signo de \pm seguido por el valor numérico indicando la incertidumbre o la desviación estándar, jamás debe estar desprovista de este dato suplementario. No es correcto decir simplemente que el resultado nos arrojó una edad de 4520 años antes del presente, puesto que, aunque el lector pueda intuir que el formato del número sugiere la edad sin calibrar, se estaría ocultando el valor de la incertidumbre, no permitiendo a los colegas apreciar la precisión del resultado, algo que podría ser interpretado por terceros como un intento de manipular o tergiversar la información a nuestro favor. Ello conlleva fuertes implicaciones éticas en dos sentidos: por un lado, tenemos la obligación moral y profesional de informar el resultado tal y como nos ha sido entregado por el laboratorio que lo produjo; por el otro, debemos denotar transparencia y sinceridad en el escenario de los debates profesionales.

También es importante tener claro que una fecha de radiocarbono sin calibrar no debe ser reportada como antes de Cristo o después de Cristo, ya que ello es imposible; sólo las fechas calibradas tienen relevancia en relación a nuestro sistema calendario cristiano. Una fecha de ^{14}C indica siempre una edad antes del presente (como sabemos, antes de 1955) y de ninguna manera un laboratorio la comunica de esa manera errónea. Descuidar este aspecto (algo que también es notorio en algunas publicaciones o posters de difusión de resultados para el público en general) puede generar la propagación de información equivocada entre los lectores, causarnos problemas de credibilidad con los colegas e incluso llevar al deterioro de nuestra relación profesional con los laboratorios de fechamiento.

Los arqueólogos tenemos la obligación moral (y también legal) de informar siempre, tanto en publicaciones como en comunicaciones orales, la clave de

la muestra otorgada por el laboratorio que produjo los resultados (ej. Beta-xxxx, LEMA-xxxx), la cual debe aparecer directamente en el texto (no como nota a pie de página), en la misma frase o tabla que el resultado a reportar, inmediatamente antes de escribir el resultado en sus dos versiones, sin calibrar y con calibración. De este modo mostramos, en primer lugar, que nuestra fecha es un resultado real y no ficticio, la cual puede ser rastreada y cotejada por los colegas y por los laboratorios mismos. Ello es importante sobre todo si los colegas científicos o el personal del laboratorio manifieste dudas sobre errores o incongruencias en el resultado publicado. También es una actitud respetuosa por parte del arqueólogo hacia el trabajo realizado por el laboratorio de fechamiento, y un ejercicio más de transparencia y cordialidad profesionales.

Al comunicar fechas calibradas, es recomendable escribir siempre el rango completo indicado por la calibración y si se trata de un cálculo a un sigma (68% de probabilidad) o a dos sigma (95%), así como también con cuál versión de software de calibración se realizó dicha calibración y qué curva de calibración internacional se empleó (e.j. OxCal 4.2, INTCAL13 o versiones anteriores). De este modo, quienes manifiesten dudas cuentan con el número de muestra del laboratorio, la fecha en bruto y la incertidumbre (\pm), así como con el dato necesario para que ellos mismos repliquen la calibración accediendo en línea a los programas de calibración más recientes. También se puede manejar en nuestros textos académicos la edad calibrada media, en vez del intervalo de la edad, pero ello solamente se puede hacer después de haber escrito en párrafos anteriores del texto el intervalo correcto, completo de fechas calendario y siempre indicando que se trata de una edad media calibrada (average calBP).

Tanto arqueólogos como estudiantes y público en general debemos comprender que, a través de las dos técnicas de fechamiento por radiocarbono, nunca podremos obtener un año preciso para nuestras muestras, sino solamente aproximaciones, estimaciones.

Praxis y política en el manejo de fechamientos por radiocarbono en arqueología

Obtener una fecha absoluta por medio de alguna de las dos técnicas del método del ^{14}C no es suficiente para ninguna de las situaciones en las cuales, como arqueólogos, utilizaríamos tales resultados: ni para comprobar o refutar hipótesis de trabajo, ni para apoyar o rebatir paradigmas establecidos, ni para aportar argumentos en un debate. Una sola fecha no es suficiente, no es creíble y de

ninguna manera tiene relevancia bajo las nuevas expectativas y exigencias con las cuales nos estamos confrontando en nuestra especialidad.

Para salir a la luz ante la comunidad científica con nuevos resultados de radiocarbono se requiere de una serie entera de fechamientos basada en una combinación de variables. Solamente una sólida articulación de resultados con baja incertidumbre y con réplicas obtenidas de varios laboratorios puede ofrecer las bases necesarias para la construcción de argumentos viables en el discurso arqueológico. El mundo de la arqueología es un mundo altamente político en el cual el choque de ideas y la confrontación de posturas pueden adquirir dimensiones dramáticas, lo cual aumenta proporcionalmente al grado de complejidad y polémica de los distintos entornos temáticos de nuestra disciplina y también en relación al grado de internacionalización de los mismos y el número de colegas involucrados en las investigaciones desde posturas a menudo contrarias o antagónicas. Una fecha de AMS puede ofrecer, para cada uno de nosotros, la pequeña prueba necesaria a favor de lo que ya estábamos sospechando como hipótesis de trabajo. Pero aquello que es suficiente para la investigación propia no siempre lo es para los demás, que juzgan desde su propia óptica, y la faena de alcanzar aceptación y ganar terreno en los debates requiere de ciertas habilidades que incluyen el manejo astuto y políticamente blindado de los fechamientos por radiocarbono.

Además de ello, K. Popper (1983) nos ha enseñado que una epistemología falibilista (falsacionista) es la más sana para el avance del conocimiento científico, ya que a través de ella estamos siempre conscientes de que cada teoría es falible (refutable), lo cual nos lleva a desarrollar una actitud de constante cuestionamiento hacia nosotros mismos -incongruente con las posturas que llevan hacia la rápida paradigmización de los nuevos conocimientos- y una constante puesta a prueba de nuestros hallazgos. Una sola fecha de radiocarbono en nuestro sitio no es motivo para celebrar, sino motivo para dudar de ella y buscar comprobarla con más fechamientos y más técnicas.

¿Qué se requiere, entonces, para contar con un esquema sólido de fechamientos de radiocarbono?

La receta básica consiste, principalmente, en una pluralidad de fechas obtenidas por AMS (técnica actualmente preferida y favorecida por encima de la técnica tradicional de centelleo líquido), cuyos resultados muestren muy bajas desviaciones estándar (incertidumbres) y que coincidan entre sí. Los 'ingredientes' de esta sencilla (aunque costosa) receta se basan en el principio fundamental del cruce de datos, de la intercalación de fechamientos con resultados idénticos o

similares hechos sobre distintos materiales, provenientes de distintos sectores de un contexto y por parte de distintos laboratorios. Sistematizando, para contar con una serie de fechamientos sólida y creíble ante la comunidad académica y ante nosotros mismos, debemos tener en cuenta las siguientes acciones a seguir:

- a. Contar con réplicas: es decir, contar con al menos una fecha de AMS obtenida de cada uno (o al menos de dos) de los componentes probables de un contexto arqueológico: una fecha sobre carbón vegetal, otra sobre hueso, otra sobre artefactos de madera o de concha, otras sobre sedimento o de las distintas fracciones de un sedimento, etcétera.
- b. Asegurarse de que las muestras a partir de las cuales se obtuvieron las fechas de AMS provengan de al menos dos sectores distintos (en horizontal) de un estrato, contexto o unidad estratigráfica, para evaluar/refutar la posibilidad de intrusiones o contaminaciones puntuales de los contextos a fechar.
- c. Asegurarse de que en la serie de fechamientos se haya involucrado más de un laboratorio, desarrollar el hábito de entregar muestras a mínimo dos laboratorios AMS para comparar los resultados. Los mismos laboratorios se pueden beneficiar en forma positiva de la réplica de sus resultados y usarlas para evaluar su propio desempeño y contribuir al fortalecimiento de su prestigio internacional.
- d. Contrastar los resultados de fechamientos por AMS con los resultados de otros métodos de fechamiento aplicados sobre los mismos contextos o sobre contextos asociados, en relación estratigráfica conocida; tales otros métodos podrían ser la termoluminiscencia (TL) sobre materiales quemados (piedras quemadas, cerámica, sedimentos afectados por incendios), la luminiscencia por estimulación óptica (OSL) sobre los granos de cuarzo en los sedimentos, los nucleidos cosmogénicos, el paleomagnetismo o la medición del decaimiento de otros isótopos radiactivos (uranio/torio, potasio/argón, etc.) (ver Walker, 2005)
- e. Desarrollar el hábito del bracketing (del inglés *bracket*, corchete), es decir el fechamiento de prueba y con fines de corroboración de elementos extraídos de los estratos situados por encima y por debajo de la unidad estratigráfica de interés, con el fin de evaluar el correcto comportamiento de los resultados en concordancia con la disposición estratigráfica de las muestras.

Si se logran alcanzar estos cinco aspectos metodológicos y estratégicos, podemos contar con un fuerte argumento basado en fechamientos de radiocarbono que dejaría muy poco espacio para dudas y cuestionamientos.

¿Qué esperar, como usuarios, por parte de un laboratorio de AMS?

No se puede omitir un aspecto crucial, pero a menudo delicado y poco discutido públicamente que es el prestigio internacional de un laboratorio de fechamientos por radiocarbono. Agregando una variable más al ya complicado panorama de requisitos mencionado, debemos tener en cuenta, de forma seria y profesional, el prestigio que determinado laboratorio tiene ante los colegas que se desempeñan en cierto campo de la investigación arqueológica. Si nuestra investigación involucra tópicos que son motivo de arduos debates y polémicas, el cumplimiento de los cinco pasos metodológicos quizás no sea suficiente si el o los laboratorios involucrados no cuentan con el prestigio y la credibilidad necesarios para que sus resultados sean convincentes para todos los colegas. Saber cómo lidiar con este aspecto delicado depende de cada investigador, de su relación con sus pares a nivel internacional, y de su constante comunicación y consultoría e intercambio de ideas con terceros.

En primer lugar, es necesario que procuremos replicar los resultados de un laboratorio pequeño, joven o poco conocido enviando una porción de la misma muestra o una muestra compatible a otro laboratorio que cuente con un prestigio y reconocimientos ya ganados ante los demás miembros del gremio, y que haya prestado ya servicios en el campo arqueológico por un tiempo considerable, amparado por suficientes publicaciones y buenas referencias verbales. En segundo lugar, es clave que los laboratorios que estamos empleando cuenten con su propio acelerador, como es el caso del LEMA, de BETA Analytic, Universidad de Oxford, Universidad de Arizona y muchos otros. Sin embargo, hay muchos laboratorios que solamente preparan la muestra recibida, la transforman en grafito o CO_2 puro y la alistan para ser leída por un equipo AMS, pero no tienen su propio acelerador, sino que envían el cátodo a terceros, aunque después ellos mismos nos entreguen los resultados. Tales laboratorios son bastante comunes alrededor del mundo y suelen ofrecer precios mucho más accesibles que los laboratorios comerciales; pero, como es de pensarse, pueden generar sospechas de errores, de mala praxis o de confusión en el manejo de muestras al pasar éstas por varias manos. Es importante que nosotros, como clientes, preguntemos siempre a los laboratorios si cuentan con su propio acelerador y, de no ser así pero decidimos usar sus servicios, tener el cuidado de replicar sus resultados con muestras enviadas a laboratorios de mayor prestigio y/o tener la honestidad de informar sobre la situación cuando publiquemos o comuniquemos oralmente los resultados. Cualquier arqueólogo puede descargar la lista actualizada de laboratorios de ^{14}C dispo-

nibles en el mundo de la página de internet www.radiocarbon.org y establecer contacto personal con los mismos.

Es muy importante que los arqueólogos, como usuarios, mantengamos una constante comunicación con los laboratorios de AMS, conversar con el personal sobre las particularidades de la muestra y del contexto de origen, sobre las necesidades particulares y las preguntas de investigación que buscamos resolver. Los protocolos a seguir por parte del personal en el área de pretratamiento de la muestra no siempre están diseñados para cumplir con nuestras expectativas en situaciones específicas. Un buen diálogo, desde un buen inicio, que involucre el interés del laboratorio en los significados de la muestra más allá de la simple relación empresa-cliente, establece el camino para la adopción de las mejores estrategias metodológicas para el adecuado tratamiento de la muestra, en vista de buenos resultados y futuras colaboraciones positivas. La retroalimentación activa entre usuarios y laboratorios es una de las prácticas que más contribuye al constante mejoramiento de la técnica y de la relación entre las ciencias duras y la investigación arqueológica.

Conclusión

Fechar por ^{14}C es una tarea cara que ciertamente ejerce una presión considerable sobre los presupuestos de los proyectos arqueológicos y los altos costos pueden llegar a ser prohibitivos para muchos de nosotros. La variedad de aspectos debatidos en este texto, empezando por el simple hecho de contar con unas pocas fechas de AMS podrían verse por muchos, y con buena razón, como un escenario ideal, teóricamente coherente, pero inalcanzable en el mundo real de nuestro México. Sin duda, ello es cierto y no podemos esperar que cada investigación cuente con la cantidad de fechas absolutas que garantice la credibilidad y solidez de las cronologías e implicaciones histórico-culturales y procesuales de los descubrimientos.

Pero, es muy cierto también que gran parte de la situación que vivimos actualmente en relación con el reducido empleo de fechamientos por ^{14}C en nuestra vida profesional tiene que ver con la visión que nosotros mismos tenemos, dentro del gremio, sobre el quehacer arqueológico y las funciones sustantivas de nuestra profesión. Si bien es cierto que la arqueología debe preservar, conservar y promover el patrimonio cultural de la nación, la función primordial debe ser, antes de cualquier otra, la de investigar y generar conocimiento. Mientras que el conocimiento, por sí mismo, no sea asumido, tanto por nosotros como

investigadores, así como por las autoridades y el público en general, como el principal producto de nuestro trabajo, nuestra función social seguirá siendo enigmática y confusa. Al no comprender que nuestro deber ético (y émico) es antes que nada generar un conocimiento científico debidamente sustentado, no podremos enfocar nuestra atención y esfuerzos hacia la aplicación de recursos principalmente en la dirección de estudios y servicios destinados a la obtención de resultados científicos.

Ciertamente, el costo de una serie completa de fechamientos por AMS es muy alto y se puede medir hoy en decenas o cientos de miles de pesos. Pero, por otro lado, el beneficio que éstos ofrecen a favor del conocimiento humano es mucho mayor que otros gastos que solemos aplicar de forma tradicional y acostumbrada en nuestros proyectos arqueológicos. No podemos hacer mucho más como estudiosos del pasado sino esperar que en un futuro cercano la óptica de todos nosotros cambie a favor del conocimiento científico y la inclusión de los fechamientos absolutos como una práctica cotidiana y obligada en la práctica de la arqueología.

Referencias

- Adovasio, J.M. y Pedler, D.R., 2014. The Ones That Still Won't Go Away: More Biased Thoughts on the Pre-Clovis Peopling of the New World. En: Kelly, E. *et al.* (ed.), *Paleoamerican Odyssey*. EUA: College Station. Texas A&M University Press.
- Ardelean, C.F., 2013. *Archaeology of Early Human Occupations and the Pleistocene-Holocene Transition in the Zacatecas Desert, Northern Mexico*. Tesis doctoral. RU. University of Exeter.
- Ardelean, C.F., 2014. The Early Prehistory Of The Americas And The Human Peopling Of The Western Hemisphere. An Overview Of Archaeological Data, Hypotheses and Models. Bucarest: Asociación Arqueológica Rumana. *Studii de Preistorie*, 11:33-95.
- Ardelean, C.F. y Macías Quintero, J.I., 2016. ¿Qué tan temprano es lo temprano? Consideraciones sobre la prehistoria mexicana y el sitio arqueológico de Dunas de Milpa Grande, Zacatecas, en José Concepción Jiménez. En: Aguilar, F., Serrano, C. y González, A. (ed.). *El Poblamiento Temprano en América* 7, pp. 97-131, Museo del Desierto y la Dirección de Antropología Física del Instituto Nacional de Antropología e Historia, Saltillo y Ciudad de México.
- Binford, L.R., 1988 [1994]. *En busca del pasado. Descifrando el registro arqueológico*. 3ª edición. Barcelona: Editorial Crítica.

- De los Ríos Paredes, M.M., 2012. Análisis de las fechas de radiocarbono obtenidas para el Rancho La Amapola, Cedral. En: Mirambell, L. (ed.), *Rancho La Amapola, Cedral. Un sitio arqueológico-paleontológico pleistocénico-holocénico con restos de actividad humana*, pp. 295-308. Ciudad de México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Head, M.J., Gibbard, P., 2015. Formal Subdivision of the Quaternary System/Period: Past, Present and Future *Quaternary International*, 1-31.
- Popper, K., 1983. *Conjeturas y refutaciones. El desarrollo del conocimiento científico*. Barcelona: Editorial Paidós.
- Reimer, P.J. et al., 2013. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4).
- Viñas-Valverdú, R., 2015. Recent Archaeo-Palaeontological Findings from Barranca del Muerto site, Santiago Chazumba, Oaxaca, Mexico, *Quaternary International*, 1-15.
- Walker, M., 2005. *Quaternary dating methods*. R.U.: John Willey and Sons.