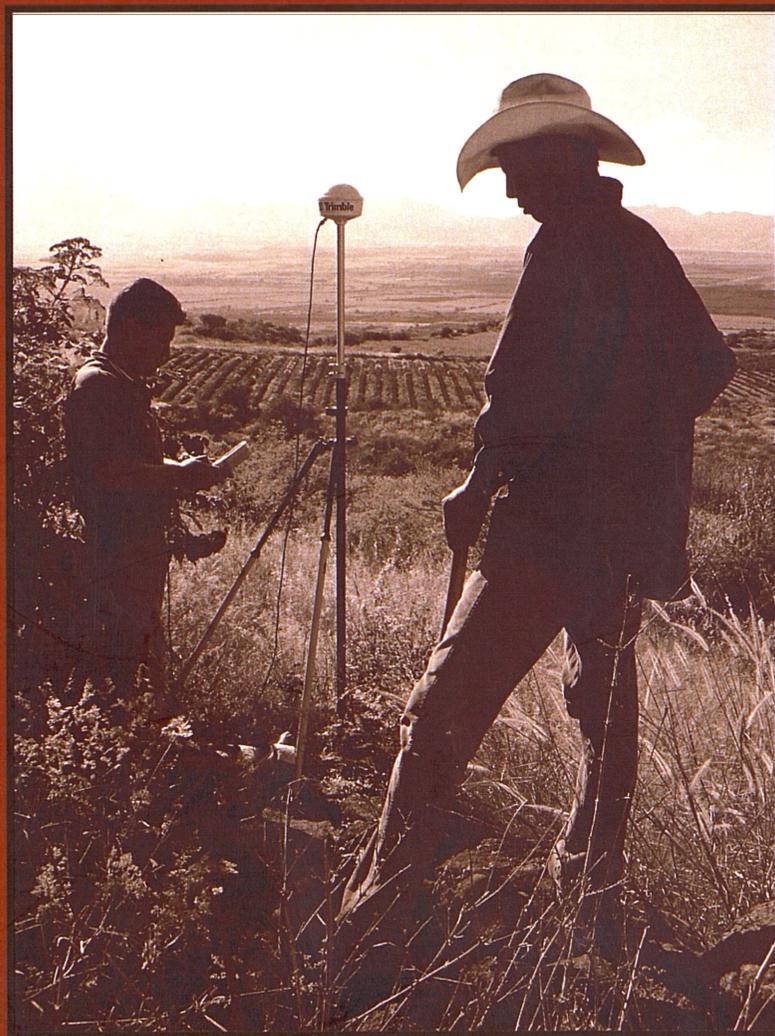


# Arqueometría

Rodrigo Esparza López  
Efraín Cárdenas García  
Editores



28

El Colegio de Michoacán

ARQUEOMETRÍA  
TÉCNICAS NUCLEARES Y CONVENCIONALES  
APLICADAS A LA INVESTIGACIÓN ARQUEOLÓGICA

Rodrigo Esparza López  
Efraín Cárdenas García  
Editores



El Colegio de Michoacán

## ÍNDICE

Introducción <i>Rodrigo Esparza y Efraín Cárdenas</i>	9
Desarrollo de las técnicas empleadas en la elaboración de mapas de asentamientos prehispánicos <i>Eugenia Fernández-V. Medina</i>	15
Estudios de PIXE y difracción de rayos X en cerámicas de la cuenca de Cuitzeo <i>Lauro Bucio, Agapi Filini y José Luis Ruvalcaba</i>	23
Análisis de piezas arqueológicas con la técnica PIXE <i>Dolores Tenorio C.</i>	43
Técnicas de manufactura de vidriados en mayólicas coloniales <i>Fabiola Monroy Guzmán, Patricia Fournier, Ziga Smit, Javier Miranda, José Luis Ruvalcaba y Javier de la Torre</i>	55
Caracterización de la pintura mural teotihuacana: aplicación de haz de partículas externo como técnica no destructiva <i>Cristina Martínez, José Luis Ruvalcaba, M. Ángeles Ontalba y Linda Manzanilla</i>	73
Técnicas nucleares y convencionales aplicadas al análisis de metales purhépecha de la Colección Pareyón <i>Ursula Méndez, José Luis Ruvalcaba, José Antonio López y Dolores Tenorio C.</i>	93
Arqueometría de cerámicas y obsidias con la espectroscopía Mössbauer <i>Agustín Cabral Prieto</i>	109
Análisis de obsidias prehispánicas por la técnica de activación neutrónica <i>Rodrigo Esparza López, Dolores Tenorio C. y Melania Jiménez Reyes</i>	137
Circulación de la obsidiana entre el altiplano y la región de El Tajín, un estudio a través del análisis por activación neutrónica <i>Ricardo Leonel Cruz Jiménez</i>	153
Análisis de materiales arqueológicos a través de la microscopía electrónica de barrido <i>Alejandra Camacho, Sandra Elizalde, Carlos Mandujano, Gianfranco Cassiano y Dolores Tenorio</i>	167

Fechamiento por radiocarbono <i>Luz Lazos Ramírez</i>	181
Uso de bases de datos para el análisis de documentos históricos. El ejemplo del sistema Textus y los testamentos del siglo XVI <i>Magdalena A. García Sánchez</i>	197
Índice de figuras	209
Índice analítico	213

# EL ANÁLISIS DE OBSIDIANAS PREHISPÁNICAS POR LA TÉCNICA DE ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA

Rodrigo Esparza López  
Dolores Tenorio C.  
Melania Jiménez Reyes<sup>1</sup>

## INTRODUCCIÓN

Con el descubrimiento del neutrón en 1935 por el inglés James Chadwick se da inicio a la ciencia nuclear y en la misma década los físicos Georg Hevesy e Hilde Levy realizaron estudios para la identificación de tierras raras o elementos traza al bombardear un objeto con neutrones quedando la muestra radiactiva. Para llevar a cabo esta tarea era necesario contar con grandes flujos de neutrones y esto sólo se podía conseguir en un reactor nuclear, el cual aparece por primera vez a finales de la década de los cuarenta. Pero es hasta 1960 cuando el análisis por activación neutrónica llega a ser uno de los métodos de mayor interés para las investigaciones de materiales, debido principalmente a que el análisis proporcionaba una exactitud que muy pocos métodos analíticos alcanzaban. En nuestros días sigue siendo un método altamente confiable en el estudio tanto de materiales antiguos como modernos.

En 1967 se crea en México el Centro Nuclear “Ing. Nabor Carrillo Fuentes”, que en sus instalaciones cuenta con un reactor nuclear del tipo Triga Mark III (único reactor de investigación en México), donde al paso del tiempo se ha formado un grupo especializado en el análisis por activación neutrónica. Ahora gracias al perfeccionamiento del análisis durante varias décadas, el Centro Nuclear ha podido adentrarse en el estudio de materiales arqueológicos con esta técnica.

## PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA

### *Las reacciones nucleares*

En la naturaleza, la materia –ya se trate de seres vivos, rocas, gases, etc.– está conformada por moléculas que son combinaciones de átomos. Los átomos tienen un núcleo cargado positivamente y a su alrededor se desplazan los electrones, cargados negativamente. El núcleo del átomo está formado, a su vez, por protones cargados positivamente y neutrones, que son partículas de masa unitaria y de carga

1. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

cero, lo cual les confiere algunas características diferentes a las de otras partículas que están provistas de carga. Los átomos que constituyen la materia suelen ser, en general, estables, pero algunos de ellos se transforman espontáneamente y emiten radiaciones que transportan energía; lo que se denomina radiactividad. Las transformaciones de los átomos no sólo son espontáneas sino que se pueden inducir de varias maneras; por ejemplo, a través de un flujo de neutrones en un reactor nuclear.

En un contexto general, una reacción nuclear podría definirse como las transformaciones inducidas en los núcleos por la interacción de partículas nucleares de diferentes tipos (neutrones, protones, deutrones, fotones, etc.) con la producción de nuevos núclidos.

Cuando un haz de neutrones atraviesa cualquier tipo de objeto, dichas partículas interactúan de varias formas con los núcleos de ese material, que en general se pueden clasificar como reacciones de dispersión y reacciones de adsorción. Dentro de estas últimas se encuentran las reacciones de captura radiactiva, en este tipo de reacciones el núcleo-blanco (o muestra) captura la partícula incidente y forma un núcleo compuesto "excitado". Este a su vez, por emisión de radiación  $\gamma$  (gamma), se transforma en otro núcleo, en un estado menos excitado, el cual puede ser radiactivo.

El reactor nuclear es el equipo más utilizado para efectuar el análisis por activación, debido a los flujos neutrónicos que se pueden obtener y a las facilidades para la irradiación de muestras. En menor extensión se utilizan en análisis por activación los aceleradores de partículas cargadas, como fuente de neutrones.

### *El reactor nuclear Triga Mark III*

Un reactor nuclear se basa en la fusión nuclear de ciertos átomos como el del  $U^{235}$ . En esta reacción la partícula incidente penetra en los núcleos-blancos y forma un núcleo excitado en un nivel tan alto que puede deformarse hasta romperse en fragmentos. Este proceso se acompaña con la emisión de dos o tres neutrones y libera una gran cantidad de energía. El fenómeno produce, a su vez, nuevas fisiones y permite establecer una reacción en cadena, la cual debe ser controlada. Así se obtiene un alto flujo de neutrones sobrantes que pueden ser utilizados para la irradiación de las muestras.

El Triga Mark III del Centro Nuclear "Nabor Carrillo", es un reactor para investigación del tipo piscina, fabricado por la General Atomic Co. Se enfría por medio de agua y utiliza uranio enriquecido con  $U^{235}$  al 20 y 70%, material homogéneamente combinado con hidruro de circonio como moderador. Su potencia máxima a su nivel estable es de 1 000 kw, en cualquier posición de la alberca.

### ¿QUÉ ES EL ANÁLISIS POR ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA?

El análisis por activación neutrónica constituye una de las técnicas más recientes en el estudio multielemental de materiales. En algunos casos su alta sensibilidad lo hace la técnica de mayor eficacia en cuanto a la detección de elementos en el nivel de  $\mu\text{g/g}$  e incluso  $\text{ng/g}$ .

Tal como lo indica su nombre, el análisis por activación neutrónica (NAA por su denominación en inglés) se basa en hacer radiactivos a ciertos elementos constituyentes de una muestra, por medio de su exposición a un flujo uniforme y constante de neutrones térmicos para determinar pos-

teriormente su radiactividad. Para estabilizarse, la muestra emite isótopos radiactivos de gran utilidad para identificar y determinar la concentración de cada elemento presente.

El análisis por activación neutrónica consta fundamentalmente de dos etapas principales:

- a) la producción de la radiactividad mediante la irradiación de la muestra, y
- b) la medida o identificación de la misma mediante los detectores adecuados.

Para analizar cualquier sustancia se utiliza el método comparativo, el cual consiste en irradiar simultáneamente con la muestra desconocida una masa conocida del elemento o elementos a determinar y en medir la radiactividad relativa de la muestra y del comparador o patrón, llamado en inglés *standard*. El uso de este patrón es necesario para el control de calidad del análisis. Además, el uso de estos materiales primarios—generalmente hechos con materiales muy puros—proveen a la muestra un resultado de mayor precisión.

Cuando los parámetros nucleares y de la irradiación son análogos para la muestra y el patrón o *standard*, la ecuación para el cálculo de las concentraciones queda de la siguiente forma:

$$\frac{A(\text{muestra})}{A(\text{patrón})} = \frac{W(\text{muestra})}{W(\text{patrón})}$$

Donde  $A$  (muestra) y  $A$  (patrón) son las actividades relativas corregidas por decaimiento;  $W$  (muestra) y  $W$  (patrón) el peso de la concentración del elemento, si la cantidad de muestra y patrón son iguales. (Los patrones de referencia y de peso conocido deben ser irradiados simultáneamente con la muestra, en posiciones muy próximas, donde reciban el mismo flujo neutrónico. Además de procesar y medir las muestras y patrones con el mismo detector y en las mismas condiciones.)

#### DETECTORES Y ESPECTRO DE RADIACIÓN GAMMA

Los espectrómetros nucleares que miden la radiactividad constan de un detector de radiaciones, de una fuente de voltaje, de amplificadores para las señales generadas en el detector, de un equipo analizador que clasifica esas señales en función de su energía y de una unidad de lectura, ya sea un graficador o un impresor.

El detector de germanio hiperpuro utilizado en el Centro Nuclear es un cristal de germanio con una concentración de impurezas de  $3 \times 10^{10}$  átomos/cm<sup>3</sup>. Éste es del tipo de los detectores semiconductores.

Las señales que salen de los detectores son muy pequeñas, por lo que se requiere de dispositivos para amplificarlas, de tal manera que puedan ser analizadas. Los preamplificadores se usan cuando las señales son muy pequeñas para un amplificador normal, o bien cuando el detector y el amplificador se encuentran muy separados entre sí y se corre el riesgo de perder las señales en los cables. Las señales pasan del preamplificador al amplificador, que además de amplificarlas les da la forma necesaria para su análisis. Las señales que salen de éste van a un analizador.

El tamaño de los pulsos generados en el detector está determinado por la energía absorbida por el mismo. Por ese motivo, en un analizador se pueden clasificar los pulsos en función de su

tamaño, es decir, de la energía de las partículas de la radiación incidente, por medio de un dispositivo llamado “ventana”, que sólo acepta los pulsos que tienen una altura previamente determinada y los acumula durante cierto tiempo. Los analizadores multicanales consisten en una serie de pequeñas ventanas denominadas canales; cada una de ellas acepta sólo los pulsos que poseen una altura determinada y los acumula (véase figura 1). La información que se obtiene después de un cierto tiempo se traduce en un espectro de energía, que se construye haciendo una gráfica del número de cuentas acumulado en cada canal en función del número de éste, es decir, de la energía.

#### VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL NAA EN MATERIALES ARQUEOLÓGICOS

El análisis por activación neutrónica ha permitido desde su invención estudiar un sinnúmero de materiales arqueológicos; sin embargo, presenta ventajas y limitaciones en su ejercicio, como veremos a continuación.

Las ventajas del uso de la técnica por NAA son las siguientes:

- La técnica provee una sensibilidad muy alta para varios elementos.
- Prácticamente puede determinar dos tercios de la tabla periódica de elementos como  $10^{-6}$  g/g o más bajo.
- Esta técnica es muy selectiva, pues existen varios parámetros experimentales que se pueden ajustar de acuerdo con el interés del investigador.
- Las diferencias de vida media de los elementos sirven de igual manera para discriminar entre elementos deseados.
- Es un análisis multivariable donde podemos inducir cierta radiactividad en los elementos para caracterizarlos, por lo que nos basamos en el uso de un multicanal que capta las diferentes energías de los rayos  $\gamma$  para cada elemento.
- La rapidez del análisis: en particular aquéllos basados en el estudio de elementos de vida media corta, sin embargo existen algunos elementos de vida media larga que requieren desde un día o hasta una semana para su estudio.

Entre sus desventajas tenemos que:

- Como es un análisis que busca pequeñas cantidades o trazas de elementos las muestras deben estar perfectamente limpias, por lo que a veces la contaminación de las muestras es un factor de riesgo en los resultados.
- En ocasiones para muestras de tamaño preciso como en el estudio de monedas, la técnica no es destructiva; pero cuando se necesita hacer el análisis a materiales como el vidrio (obsidiana) o los tejidos vegetales, las muestras se destruyen.
- Otro problema radica en el costo del análisis, ya que no en cualquier sitio existe un reactor nuclear donde se pueda bombardear con un flujo de neutrones, en México sólo el Centro Nuclear cuenta con un reactor para investigación. Los costos de irradiar las muestras son elevados, aunque todo depende de la disponibilidad y la participación de las instituciones involucradas.
- La técnica no puede detectar elementos ligeros como pueden ser el N, O, H, C, entre otros, que en ocasiones son muy importantes para señalar las concentraciones totales en la muestra,

para ello es mejor utilizar otros métodos como podría ser el uso de un acelerador de partículas por el método PIXE (donde la muestra no se destruye) (Nuncio 1998).

#### PROYECTO BANCO DE DATOS DE LOS YACIMIENTOS DE OBSIDIANA DEL OCCIDENTE DE MÉXICO (ANÁLISIS POR ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA)

Como se ha explicado, el uso de la activación neutrónica en materiales arqueológicos se desarrolló desde los años 1960. En México desgraciadamente su uso es muy posterior, tan sólo a mediados de la década de 1990 se hicieron los primeros estudios.

Sin duda alguna nos enfrentamos a un reto mayor el cual consiste en crear bancos de datos de distintos materiales para tener parámetros de comparación de los materiales estudiados. En distintas instituciones del extranjero (Missouri Research Reactor, University of Berkeley, entre otras) ha sido de gran importancia la posibilidad de poder comparar los bancos de datos de cada investigación con otros provenientes de diferentes instituciones. Los resultados a que han llegado presentan cierto margen de error aun usando los mismos patrones de estudio, por lo que es recomendable utilizar únicamente bancos de datos propios; por ello, en el proyecto de esta investigación se pretende que el Centro Nuclear tenga su propio acervo de información de los distintos yacimientos de obsidiana que existen en el territorio mexicano, para que posteriormente se haga el análisis confiable de materiales provenientes de distintos sitios arqueológicos para saber su procedencia.

Se analizaron 13 yacimientos de obsidiana que se ubican en los estados de Michoacán, Jalisco, Guanajuato y Zacatecas (en la figura 2 se muestra su localización geográfica). Las muestras geológicas se obtuvieron de distintos proyectos de investigación, del Instituto Nacional de Antropología e Historia, del Centro de Estudios Mesoamericanos y de Centroamérica (CEMCA) y de la Universidad de Nueva Orleans (Cárdenas 1988; Darras 1987, 1991, 1994; Healan 1997).

Una de las problemáticas que enfrentamos al estudiar los yacimientos de obsidiana en el occidente de México se vincula con la variedad de colores que existen en distintos yacimientos, en la tabla 1 se pueden ver los yacimientos a estudiar y sus diferentes colores de obsidiana. Con ello, queremos mostrar la dificultad que existe para estudiar este material a nivel "ojímetro", lo cual podría acarrear errores y malversación de la información arqueológica.

Es por eso que se hace imprescindible la caracterización físico-química de las muestras geológicas, ello nos colocaría en una situación ideal para conocer posteriormente la distribución espacial y temporal de la obsidiana en el complejo cultural del occidente. A continuación veremos el proceso de preparación de la obsidiana para su análisis por activación neutrónica.

#### *El proceso de análisis de las obsidianas*

En el diagrama de flujo de la figura 3 se presentan los nueve pasos principales a seguir para la preparación y análisis de las muestras de obsidiana.<sup>2</sup> A continuación se explicarán cada uno de los puntos.

2. El proceso de preparación de muestras que se explica es aplicable no sólo a las obsidianas, sino también a distintos materiales arqueológicos que se quieran analizar por AAN.

### Selección de muestras

Se seleccionan las muestras de cada yacimiento tomando en cuenta sus distintos colores. Es preciso que las muestras sobrepasen los 500 mg o los 4.5 cm<sup>2</sup>.

### Marcado y limpieza del material

A las muestras se les asigna una clave alfanumérica para su identificación, luego se les da un baño de acetona y un baño con un equipo de ultrasonido en una solución de Extran (jabón concentrado) al 10% con agua destilada.

### Pulverizado de las muestras

Para la activación neutrónica es recomendable que el peso y la geometría sean los mismos tanto en los patrones como en las muestras problema, por esa razón es necesario pulverizar la pieza. Para ello se utiliza un pulverizador automático que consta de un mortero de ágata.

### Pesado de las muestras

Para cada una de las muestras se pesan 200 mg, dos de la muestra problema y una del patrón de obsidiana, que en éste caso se trata del *obsidian rock* (núm. 279) del NIST. El polvo a su vez se envasa en viales de polietileno libres de impurezas, para ser sometidos a la irradiación neutrónica.

### Envasado de las muestras

Los viales que contienen los 200 mg de la obsidiana y el patrón deben ir perfectamente sellados, de preferencia al calor de un mechero. Los tres viales se introducen a una bolsa de plástico (de igual manera sellada). La bolsa con los tres viales se coloca en otro vial de mayor tamaño junto con una pastilla de plomo que le sirve de lastre.

### Irradiación de las muestras

Las muestras se irradian en una posición experimental denominada SIFCA (sistema de irradiación fijo de cápsulas). El bombardeo de neutrones se lleva a cabo por un tiempo de dos horas. Después de la irradiación, las muestras se quedan dentro de la alberca por una semana hasta que sea posible su traslado al laboratorio.

### Preparación de la muestra para contarla y determinar la radiactividad

En el laboratorio, la muestra se coloca dentro del detector de germanio hiperpuro para su conteo. Esta actividad se realiza durante 3 600 segundos para cada muestra, con el detector de Ge hiper-

puro y su equipo electrónico asociado, acoplados a una computadora que funciona como analizador multicanal de pulsos mediante el programa Nucleus, con éste equipo se puede obtener el espectro de radiación gamma de cada muestra en el cual se identifican los elementos que la constituyen y la cantidad de cada uno de ellos. La figura 4 representa un espectro de radiación gamma típico de una obsidiana.

#### Determinación de porcentajes y elementos presentes

Los conteos obtenidos en el detector se procesan en una hoja de cálculo para determinar las concentraciones de porcentajes y partes por millón para cada uno de los elementos, además de hacer los cálculos de corrección por el tiempo de decaimiento de cada una de las muestras.

#### RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la composición química de las obsidianas se muestran en la tabla 2. Un total de 42 muestras de los distintos yacimientos fueron analizadas. Basándonos en estos resultados se procedió a su transformación en logaritmos y matrices de distancias euclidianas con el objeto de hacer una discriminación y comparación entre cada uno de los yacimientos. A través de estos estudios estadísticos podemos agrupar los yacimientos en “macroconjuntos” utilizando el programa de *software* Systat 5.0, por los métodos de *complete linkage* y *average linkage*. Los resultados de estos métodos se graficaron en los dendogramas de las figuras 5 y 6. En estas gráficas observamos dos macrogrupos, de los cuales se conjuntan los yacimientos con concentraciones altas en Fe y bajas, en Sc, que corresponden al grupo peralkalino, mientras que los yacimientos con concentraciones bajas en Fe y altas en Sc corresponden al grupo alcalino. Estos grupos comprenden la mayoría de los yacimientos, sin embargo, el yacimiento que corresponde al Cerro Prieto queda aislado de estos dos grupos debido a sus características químicas y físicas peculiares (muy poco vitrificada y de color mate).

En la figura 7 se muestra la gráfica bivariable entre los elementos Fe y Eu de los distintos yacimientos de obsidiana, claramente se observa una discriminación zonal que va de acuerdo con su relación geográfica, debido a su composición química y a sus características similares de formación. Encontramos que en el extremo superior de la gráfica se encuentran los yacimientos que se localizan en el estado de Guanajuato, más abajo se localizan los yacimientos localizados en el estado de Jalisco y en el extremo inferior izquierdo y derecho los pertenecientes al estado de Michoacán. La muestra proveniente de Zacatecas es muy similar a las de Jalisco debido a su cercanía con la frontera del estado.

Por último, cabe resaltar que los resultados obtenidos en esta investigación fueron comparados a los reportados por otros investigadores (Cobean *et al.* 1991, Trombold *et al.* 1991 y Darras 1994), observándose que las concentraciones coinciden en gran manera; lo que nos sirve de punto de comparación y confirmación para nuestras investigaciones. Al conocer estos resultados podemos comprobar que las concentraciones elementales de la obsidiana son particulares para cada yacimiento.

#### COMENTARIOS FINALES

Como se ha visto en este artículo, el análisis por activación neutrónica es una herramienta que nos permite inferir ciertos aspectos de composición y origen o procedencia de materiales arqueológicos. Aunque se le da énfasis al estudio en obsidiana, se pueden analizar un sinnúmero de materiales tales como la cerámica, piedras o minerales como la turquesa, el jade, el cinabrio, la malaquita, el sílex, el pederal, el basalto, entre otros.

Por otro lado, en lo que respecta al estudio de los yacimientos de obsidiana, se pretende cubrir en su totalidad el análisis de los yacimientos existentes en Mesoamérica y las áreas circunvecinas para tener un banco de datos general de los yacimientos y así fortalecer las teorías arqueológicas acerca del intercambio y comercio de la obsidiana en este esquema general mesoamericano.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Conacyt por el soporte financiero para la investigación a través del proyecto 29237-H. Al arqueólogo Efraín Cárdenas, a la doctora Veronique Darras y al doctor Dan Healan por habernos proporcionado el material geológico de los distintos yacimientos de obsidiana nuestro reconocimiento.

Tabla 1. Yacimientos de obsidiana del occidente de México y sus características físicas

	Yacimiento	Estado	Color de la obsidiana
1	Zináparo	Michoacán	Gris veteada, gris translúcida roja, negra/café y café rojiza y anaranjada
2	Varal	Michoacán	Gris translúcida, gris veteada, café translúcida
3	Prieto	Michoacán	Gris opaco azulado (no cristalizada "perlita")
4	Ucareo	Michoacán	Gris translúcida veteada
5	Zinápcuaro	Michoacán	Gris translúcida veteada
6	Tequila	Jalisco	Gris translúcida, gris veteada, café, roja, café/negra
7	Magdalena	Jalisco	Gris translúcida, gris veteada, café, roja, café/negra
8	El Pedernal	Jalisco	Gris verdosa, gris muy clara, café clara
9	Los Pedernales	Zacatecas	Gris veteada
10	La Primavera	Jalisco	Gris veteada, gris clara
11	Abasolo	Guanajuato	Gris translúcida (humo)
12	Etzatlán	Jalisco	Gris veteada, roja/negra
13	Pénjamo	Guanajuato	Gris verdosa, gris muy clara, gris translúcida (humo)
14	Los Agustinos	Guanajuato	Gris translúcida, gris veteada, café, roja, café/negra, café anaranjada

Tabla 2. Resultados del análisis por activación neutrónica

		# de muestras	Eu	Lu	Np(U)	Pa(Th)	Yb	Sb	Cs	Sc	Rb	Fe(%)	La
1	Zinápapo	n = 4	0.77	0.5	4.22	32.3	3.21	2.15	6.96	4.28	125	0.77	53.1
2	Varal	n = 6	0.45	0.39	3.83	12.2	2.34	0.83	3.83	2.17	128	0.56	30.4
3	Prieto	n = 1	0.7	0.35	53.7	10.1	2.86	2.49	3.8	3.81	114	1.06	24.1
4	Ucareo	n = 1	0.1	0.4	2.9	13.7	2.3	0.2	5.7	2.5	140	0.6	42.6
5	Zinapécuaro	n = 1	0.02	0.6	7.5	21.8	4.3	1.5	5.8	2.8	135	0.5	29.1
6	Tequila	n = 3	0.54	0.5	2.94	12.3	3.41	0.39	2.48	3.35	112	0.78	39.3
7	Magdalena	n = 3	0.16	0.66	4.54	13.9	4.18	0.44	3.33	2.81	129	0.8	40.6
8	El Pedernal	n = 3	0.04	1.07	6.08	15.9	7.38	0.69	3.84	0.12	170	1.02	44.4
9	Los Pedernales	n = 1	0.06	0.74	2.81	14.5	4.64	0.97	4.11	2.27	150	0.81	50.7
10	La Primavera	n = 3	0.05	0.86	5.89	15.5	5.72	1.05	3.59	1.13	151	0.88	43.6
11	Abasolo	n = 3	0.49	1.05	6.45	15.4	7.21	0.74	4.86	0.69	163	0.86	75
12	Etzatlan	n = 3	0.59	0.27	2.76	10.7	1.5	0.34	1.9	1.83	102	0.63	27.5
13	Pénjamo	n = 7	0.61	1	5.59	14	6.84	0.71	3.71	1.1	130	1.17	41.8
14	Los Agustinos	n = 3	0.32	0.87	4.49	14.3	5.8	0.13	2.83	3.01	132	0.89	39

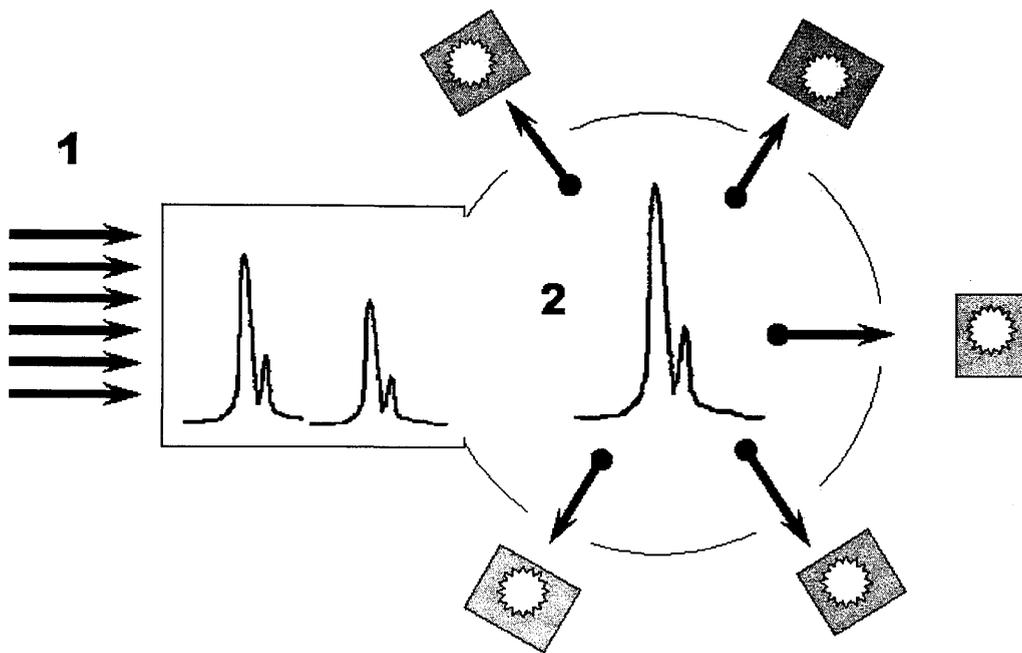


Figura 1. Esquema de un analizador multicanal: (1) llegan todos los pulsos, (2) los cuales se acumulan en el canal de acuerdo con su energía.

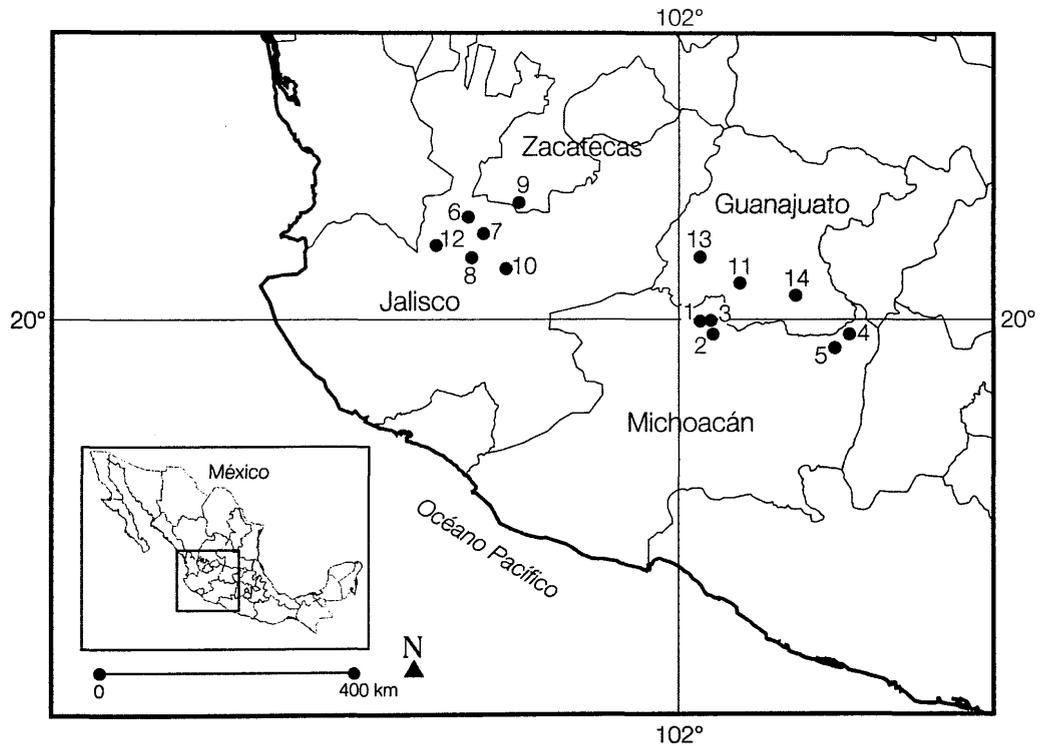


Figura 2. Mapa de localización de los yacimientos de obsidiana del occidente de México: 1. Cerro de Zináparo, 2. Cerro Varal, 3. Cerro Prieto, 4. Ucareo, 5. Zinapécuaro, 6. Tequila, 7. Magdalena, 8. El pedernal, 9. Los Pedernales, 10. La Primavera, 11. Abasolo, 12. Etzatlán-San Marcos, 13. Pénjamo y 14. Los Agustinos.

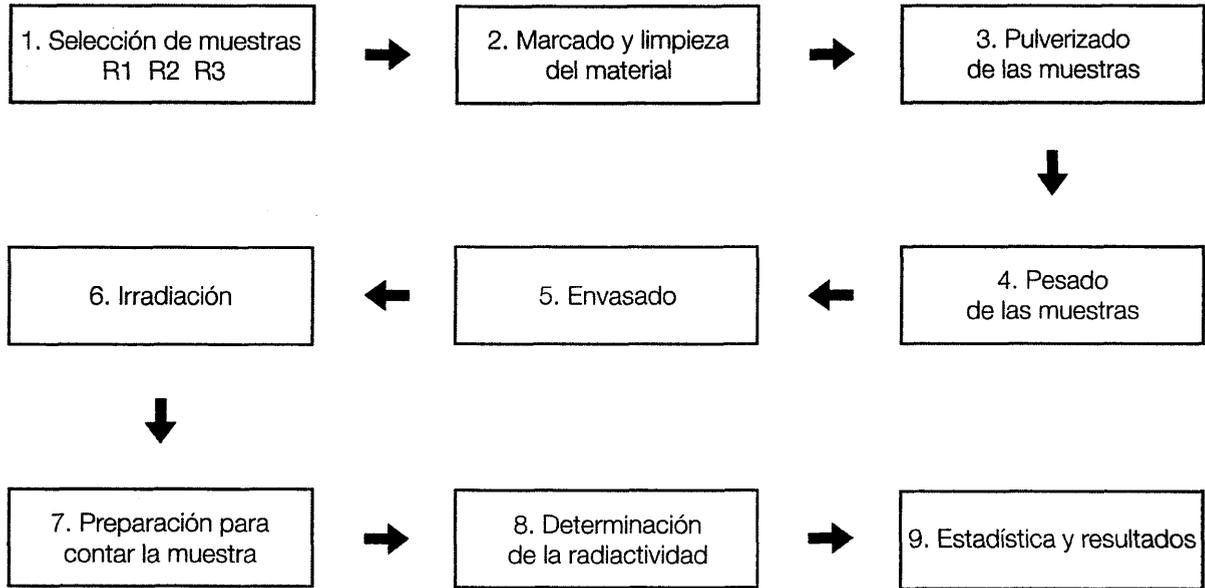


Figura 3. Diagrama de flujo para la preparación y obtención de resultados por activación neutrónica (NAA).

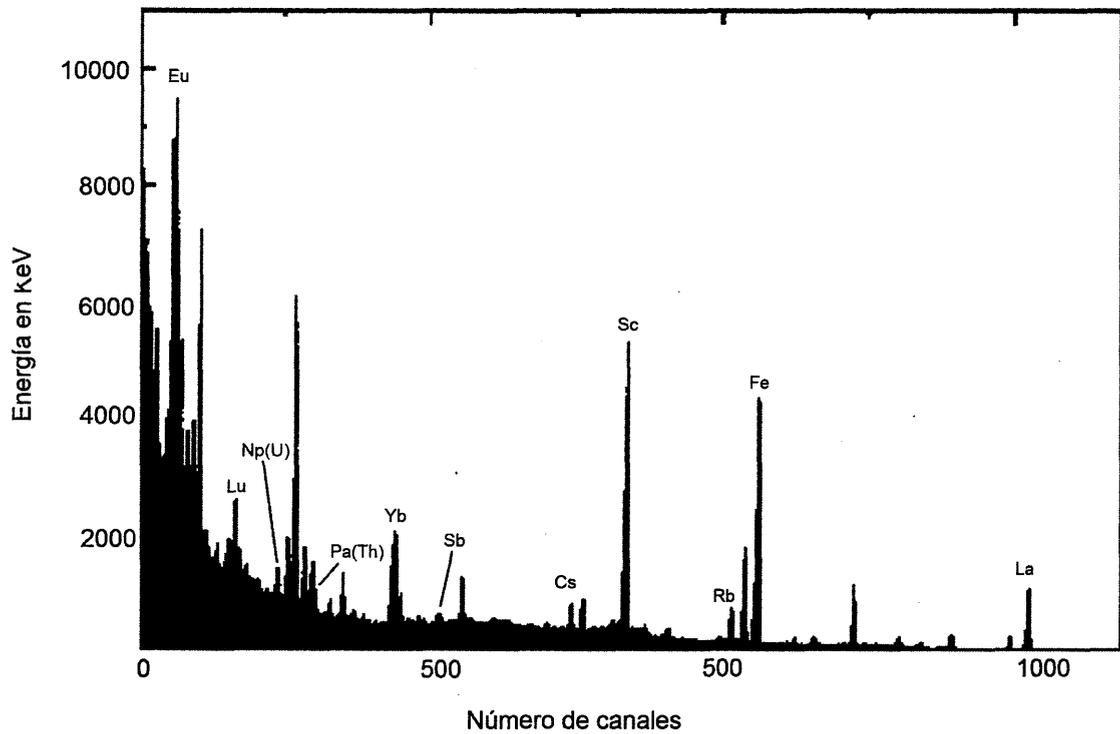


Figura 4. Espectro típico de una obsidiana analizada por activación neutrónica.

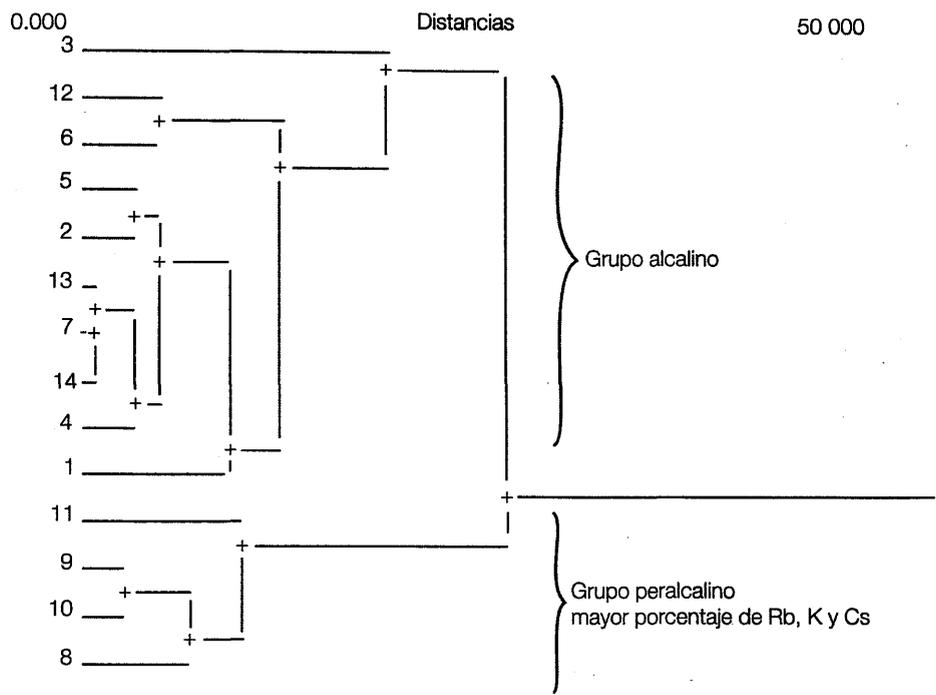


Figura 5. Dendrograma por *complete linkage*.

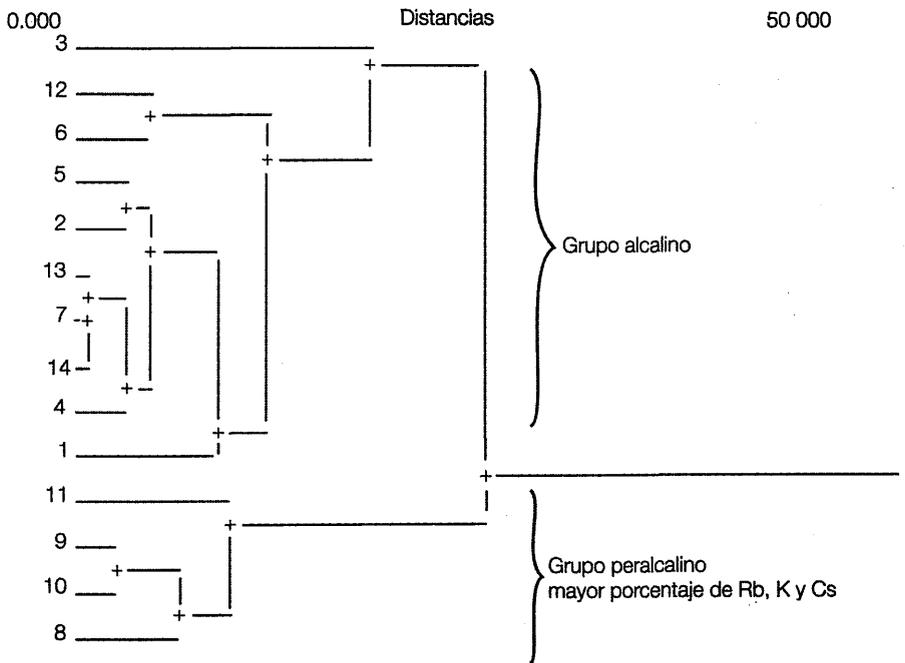


Figura 6. Dendrograma por *average linkage*.

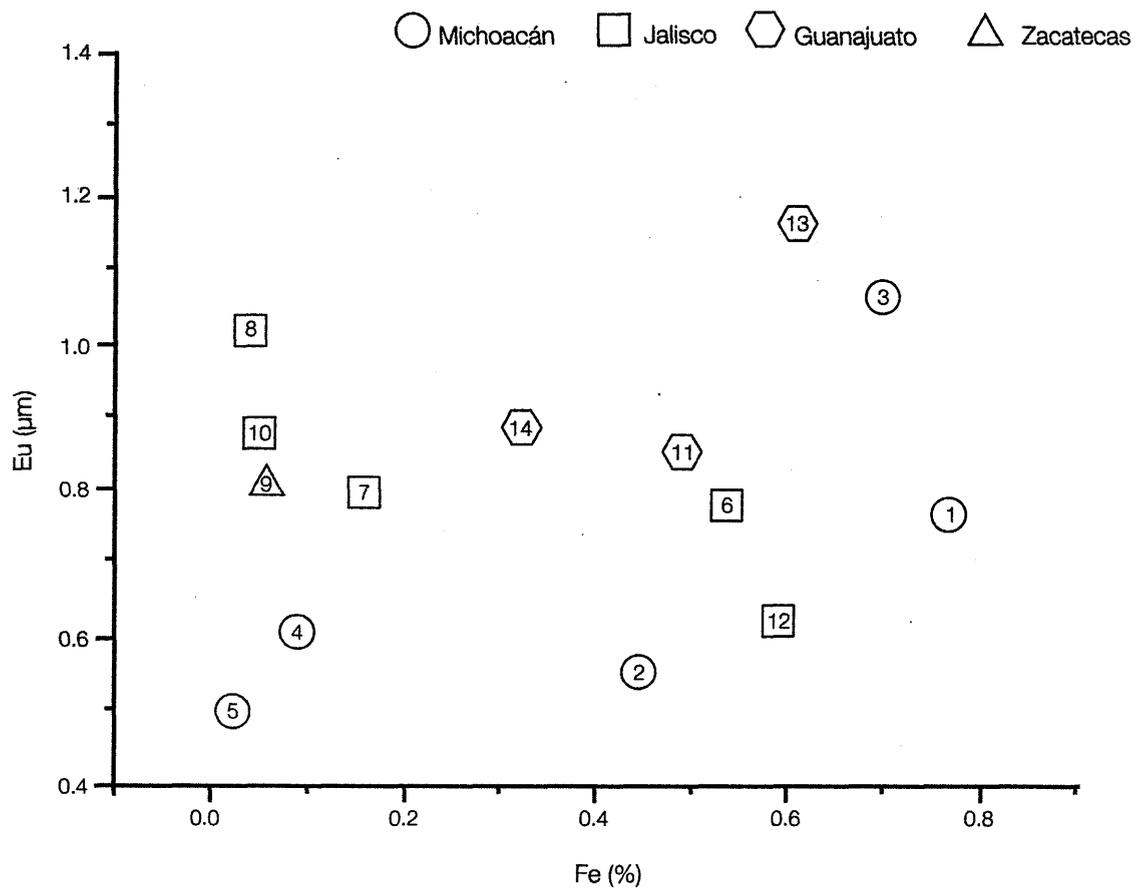


Figura 7. Gráfica bivariable discriminatoria para los yacimientos del occidente de México con porcentajes de la tabla 2.

BIBLIOGRAFÍA

CÁRDENAS, E.

1988 “Explotación de obsidiana en el sector occidental del Eje Neovolcánico”, tesis de licenciatura, México, ENAH.

COBEAN, R. y M.D. COE

1971 “Obsidian Trade at San Lorenzo Tenochtitlan, México” en *Science*, vol. 174. núm. 4010, pp. 666-671.

COBEAN, R., J. VOGT, M. GLASCOSCK, *et al.*

1991 “High-Precision Trace-Element Characterization of Major Mesoamerican Obsidian Sources and Further Analyses of Artifacts from San Lorenzo Tenochtitlan, México” en *Latin American Antiquity*, 2(1), pp. 69-91.

CRUZ ANTILLÓN, Rafael

1994 *Análisis arqueológico del yacimiento de obsidiana de Sierra de las Navajas, Hidalgo, México*, INAH (Colección Científica 281).

DARRAS, Veronique

1987 “Nota informativa: primeros resultados de la caracterización química por medio de los elementos traza de los yacimientos de obsidiana en la región de Zináparo-Purépero, Michoacán” en *Trace*, núm. 12, diciembre pp. 76-80.

1991 “Technologies préhispaniques de l’obsidienne: les centres de production de la région de Zináparo-Prieto. Michoacán, Mexique”, tesis de doctorado, París, Université de Paris I.

1994 “Las actividades de talla en los talleres de obsidiana del conjunto Zináparo-Prieto-, Michoacán” en *Arqueología del occidente de México*, Eduardo Williams y Robert Novella (coords.), Zamora, El Colegio de Michoacán.

DRENNAN, Robert

1998 ¿“Cómo nos ayuda el estudio sobre el intercambio interregional a entender el desarrollo de las sociedades complejas?” en *Rutas de intercambio en Mesoamérica. III Coloquio Pedro Bosch Gimpera*, Evelyn Childs Rattray (coord.), México, UNAM-IIA.

ESPARZA, J. Rodrigo

1999 “Aplicación de las técnicas nucleares PIXE y NAA para el estudio de las redes de comercio de la obsidiana en Tierra Caliente, Michoacán”, tesis de licenciatura, México, ENAH.

GLASCOCK, M., M. ELAM y R. COBEAN

1988 “Differentiation of Obsidian Sources in Mesoamerica” en *Proceedings 26<sup>th</sup> International Symposium*, University of Toronto.

HEALAN, Dan

1997 “Prehispanic Quarrying in the Ucareo-Zinapécuaro Obsidian Source Area” en *Ancient Mesoamerica* 8, pp. 77-110.

NUNCIO, Adriana

1998 “Análisis de obsidianas por medio de la técnica PIXE”, tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México.

RENFREW, Colin

1975 "Trade as an Action at a Distance. Questions of Integration and Communication" en *Ancient Civilization & Trade*, J.A. Sabloff y C.C. Lamberg Karlovsky (coords.), Nuevo México, School of American Research/University of New México Press.

RENFREW, Colin y Paul BAHN

1991 *Archaeology: Theories, Methods and Practice*, Thames and Hudson, Londres.

TAYLOR, R.E.

1975 "Science in Contemporary Archaeology" en *Advances in Obsidian Glass Studies*, R.E. Taylor Noyes (coord.), Nueva York, Press Park Ridge.

TENORIO, Dolores, M. JIMÉNEZ-REYES y G. LARGARDE

1997 "Mexican Obsidian Samples Analysed by PIXE and AAS" en *International Journal of PIXE*, núms. 1 y 2, vol. 7, pp. 17-24.

TROMBOLD, Charles, Toshiaki LUHR y M. GLASCOCK

1993 "Chemical Characterization of Obsidian from Archaeological Sites in Western México and the Tequila Source Area. Implications for Regional and Pan-Regional Interaction within the Northern Mesoamerican Periphery" en *Ancient Mesoamerica*, 4, pp. 255-270.