

*Denisse Argote Espino, * Jesús Solé**
*Pedro López García, ** Osvaldo Sterpone Canuto****

Análisis composicional de seis yacimientos de obsidiana del centro de México y su clasificación con DBSCAN

El centro de la República Mexicana contiene varios de los yacimientos de obsidiana más importantes en la industria lítica prehispánica. De acuerdo con algunas investigaciones arqueológicas, la expansión económica y política de muchas de las grandes culturas mesoamericanas se relaciona con el control de ciertos yacimientos de obsidiana y de sus rutas comerciales. La hipótesis por comprobar de este artículo se refiere a que la caracterización geoquímica de yacimientos naturales de obsidiana ofrece un patrón determinado que permite correlacionarla con artefactos arqueológicos. Para ello, se aplicaron el método de fluorescencia de rayos X y el de ICP-MS en el análisis de muestras de varios yacimientos importantes del México central (la sierra de Pachuca, Tulancingo, Otumba, Zacualtipán, El Paredón-Tres Cabezas y Zinapécuaro). De esta manera se obtendrá la firma geoquímica de cada uno de los yacimientos de modo que, al hacer el análisis de artefactos arqueológicos, se puedan comparar los patrones geoquímicos de los objetos con las fuentes, a fin de establecer una correlación. Asimismo, ésta se obtiene mediante algoritmos estadísticos computarizados, como el DBSCAN, con lo cual se hace una clasificación precisa de cada una de las muestras de forma automatizada. Esta investigación deja ver parte del gran potencial que los métodos geoquímicos, combinados con potentes técnicas estadísticas, tienen para la identificación de yacimientos de obsidiana; también evidencia que puede ser auxiliar en los estudios de procedencia de artefactos arqueológicos, al ayudar a determinar rutas comerciales prehispánicas.

Central Mexico has several of the most important obsidian deposits in Mesoamerican lithic industry. Based on archaeological research, the economic and political expansion of many of the major cultures in Mesoamerica were related to the control of certain obsidian sources and their trade routes. Our aim is to probe the hypothesis that the geochemical characterization of obsidian deposits can give us a specific pattern that would allow us to correlate them with archaeological artifacts. In this way, we applied XRF and ICP-MS methods to analyze samples from six important obsidian deposits in Central Mexico: Sierra de Pachuca, Tulancingo, Otumba, Zacualtipán, Paredón-Tres Cabezas and Zinapécuaro. We expect to obtain the geochemical signature of each source, so when we analyze archaeological artifacts later, we can compare patterns in order to correlate them. This correlation can be done by implementing computer statistical algorithms, like DBSCAN, that automatically calculate precise classifications of the samples analyzed. This work allows us to catch a glimpse of the great potential of the mix of geochemical methods with powerful statistical techniques to identify obsidian deposits; the role of that combination as an aid in studies of origins of archaeological artifacts is also shown here as a tool helping to determine pre-Hispanic trade routes.

* Instituto de Geología, UNAM.

** Escuela Nacional de Antropología e Historia, INAH.

*** Centro INAH Hidalgo.

Agradecimientos: investigación patrocinada por el proyecto PAPIIT-UNAM, México No. IN118809. También agradecemos a Patricia Girón, Elena Lounejeva y Juan Pablo Bernal, del Instituto de Geología, UNAM, por su colaboración en los análisis de XRF e ICP-MS.

El vidrio volcánico se forma debido al rápido enfriamiento de la lava en estado líquido, cuando se pone en contacto con la atmósfera, el agua o las rocas adyacentes más frías. Suele tomar la forma de obsidianas, *pechstein* (*Pitchstone*) y perlitas en flujos de lava, domos y diques, así como pómez y cenizas en rocas piroclásticas. La tendencia de la lava a formar vidrio es una función del rango de enfriamiento y de la composición química. Las lavas félsicas (aquellas con altos contenidos de SiO₂, Na y K) tienden a formar vidrio con mayor facilidad que las lavas máficas (con bajos contenidos de SiO₂ y altos de Mg y Fe). De esta manera, el vidrio volcánico se encuentra de manera más frecuente en riolitas, riodacitas y dacitas, que en andesitas y basaltos.

La obsidiana, con su típico lustre vítreo oscuro y su conspicua fractura concoidal, ha atraído desde hace mucho tiempo la atención del hombre, que históricamente la ha usado para manufacturar artefactos, tanto armas como objetos artísticos. Aunque suele ser de color negro, se conocen algunas variedades en tonos negro-verdoso-dorado, gris oscuro y café-rojizo. Algunas obsidianas son opacas, mientras otras muestran una marcada translucidez. La obsidiana negra debe su color y opacidad al efecto dispersor de la luz causado por miríadas de cristalitas microscópicas (cristales embrionarios). El color café-rojizo se debe a la oxidación de pequeñas cantidades de Fe presente. Las variedades negro verdoso-dorado y gris-plateado a menudo contienen abundantes vesículas diminutas (burbujas de gas), que les dan un lustre sedoso.

La obsidiana de estos dos tipos es particularmente común en México, donde es una materia prima popular para manufacturar artefactos desde épocas antiguas hasta la actualidad. En el periodo prehispánico esta materia prima era tan valiosa que se formaban grandes redes comerciales a lo largo de toda Mesoamérica para su distribución. De aquí la importancia de realizar estudios de procedencia de la obsidiana, con el fin de lograr indicadores de la interacción cultural y económica entre las antiguas civilizaciones. Durante mucho tiempo la forma de analizar

los artefactos de obsidiana por parte de los arqueólogos ha sido a través de observar a simple vista su apariencia externa. Por ejemplo, un arqueólogo puede suponer la posible procedencia de un artefacto encontrado en un recorrido de superficie o en una excavación, sólo viendo a contraluz su color y transparencia. Aun así, no puede saber con toda certeza su origen, sobre todo porque hay muchos yacimientos cuya obsidiana presenta propiedades ópticas similares.

La bondad de la obsidiana en tanto material arqueológico, comparada con otros materiales como la cerámica, los metales, la materia orgánica, etcétera, es que un mismo yacimiento tiene una composición química muy homogénea, siendo su variación interna muy pequeña. Pero entre diferentes yacimientos, dicha variación puede ser mayor. De esta forma, el uso de técnicas químicas de alta precisión permite la identificación de los yacimientos con un alto grado de seguridad. El análisis multi-elemental de los elementos traza de artefactos arqueológicos de obsidiana nos proporciona tendencias distintivas de sus patrones, de forma que pueden correlacionarse con sus fuentes. La importancia del análisis de elementos traza es que poseen propiedades químicas únicas y tienen una mayor variación en concentración que los elementos mayores, registrando procesos que en los últimos no se manifiestan. Desde la década de 1960 hasta la actualidad, se implantaron varios métodos instrumentales de análisis químico que desempeñan un papel importante en los estudios de procedencia de este material tanto en el mundo como en México (Cann y Renfrew, 1964; Carballo *et al.*, 2007; Cobean, 2002; Cobean *et al.*, 1991; Glascock *et al.*, 1998; Healan, 1997; Jiménez-Reyes *et al.*, 2001; Neivens *et al.*, 1989; Nelson, 1989; Smith *et al.*, 2007; por mencionar algunos pocos).

El centro de México contiene muchas de las minas de obsidiana más importantes en América, las cuales fueron clave para el desarrollo de la industria lítica mesoamericana en épocas prehispánicas. La explotación de estas fuentes se ha realizado durante miles de años, reutilizándolas en diferentes intervalos de tiempo,

creando así un complejo sistema de minas, talleres y asentamientos humanos asociados con las mismas. Además, algunas de sus materias primas se distribuyeron incluso hasta las tierras bajas mayas en Centro América (Clark, 1989). Por lo tanto, una buena identificación de los yacimientos y los artefactos hallados en investigaciones arqueológicas puede servir para determinar las relaciones comerciales y culturales existentes en las culturas que poblaron Mesoamérica en tiempos prehispánicos.

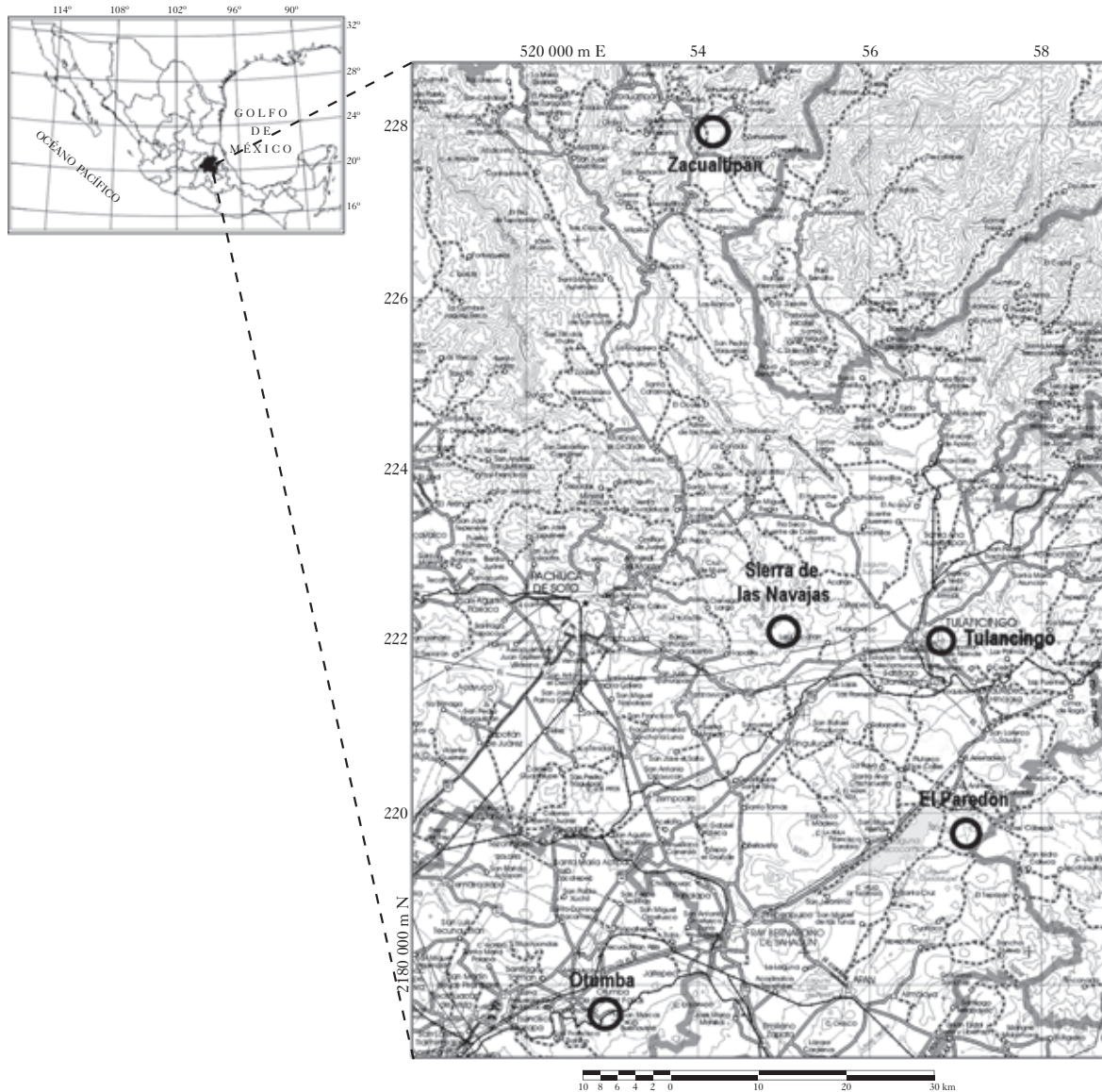
Según Gaxiola (1989), los yacimientos más importantes del Altiplano Central se clasifican en tres grandes grupos de acuerdo con su posición geográfica y sus propiedades físicas, integrados todos por varios depósitos con diferentes niveles de explotación, a saber: 1) la Sierra de Pachuca (también conocida como Sierra de las Navajas, ubicada al norte de la cuenca de México), El Pizarrín, Rancho Tenango y El Encinal (en la región de Tulancingo, estado de Hidalgo), todas caracterizadas por su color verde; 2) Otumba (Soltepec y Malpaís) y El Paredón-Tres Cabezas (dentro de la cuenca de México, en los estados de México, Puebla e Hidalgo), caracterizados por su obsidiana de color gris; 3) Zacualtipán, Mezquititlán y Huejutla (localizados en la Sierra de Hidalgo), identificados por su color negro opaco.

Algunos de los yacimientos de obsidiana con una explotación más intensiva fueron la Sierra de Pachuca y Zacualtipán; otros con un menor aprovechamiento, pero no menos importante fueron El Paredón-Tres Cabezas, El Pizarrín-Tulancingo y Otumba. En el estado de Michoacán existe un yacimiento que, aunque está relacionado con el occidente de México, fue posiblemente la segunda fuente de obsidiana más importante del centro de México después de la Sierra de Pachuca (Cobean 2002): Zinapécuaro-Ucareo. En nuestro estudio se seleccionaron seis de estos yacimientos para su muestreo y posterior análisis: Sierra de Pachuca, Otumba (Soltepec), El Pizarrín-Tulancingo, Zacualtipán, El Paredón-Tres Cabezas (fig. 1) y Zinapécuaro. A continuación se da una breve descripción de los yacimientos.

Generalidades de los yacimientos de obsidiana

Otumba, en el Estado de México, es el depósito de obsidiana más cercano a Teotihuacan, el cual tiene por lo menos una extensión de 40 km² (Cobean, 2002). Sus flujos volcánicos presentan una composición dacítica a riolítica y pertenecen a las erupciones del complejo volcánico Soltepec de los períodos Pleistocénico y Holocénico (Hernández, 2007). Las coordenadas UTM centrales del flujo de obsidiana más conocido (el domo Soltepec) son 14 532961m E y 2175389 m N. El complejo de yacimientos de obsidiana de Otumba incluye otros depósitos de obsidiana cercanos, algunos de los cuales (como el de Malpaís) se han registrado en la literatura arqueológica (Cobean, 2002; Mora, 1981). Sin embargo otros, aunque mencionados ocasionalmente (Granados *et al.*, 1991; Spence y Parsons, 1967), no se han reportado como fuentes propiamente. Tal es el caso de los domos Tepayo e Ixtepec. El domo Ixtepec ("*Cerro de las Obsidianas*", en náhuatl) se localiza a 3 km al NE de los principales yacimientos del volcán Soltepec, y en sus barrancas conocidas como La Rinconada y los Ocotes se encuentran minas de explotación prehispánica. La obsidiana de Tepayo se localiza a 5 km al N del yacimiento de Otumba, formando parte de la ladera NW del domo principal Tepayo; no existen investigaciones arqueológicas en esta localidad (Hernández, 2007). Las minas de Otumba funcionaron como una fuente importante de materia prima para los talleres teotihuacanos y mexicas; además, su presencia en sitios mayas está relacionada con esta influencia (Cobean, 2002).

En la mayor parte de las regiones de Mesoamérica se registraron artefactos fabricados con obsidiana de la región de Ucareo-Zinapécuaro, desde sitios arqueológicos cercanos de los estados de Michoacán, Hidalgo y la Cuenca de México (pasando por Morelos, Puebla, Oaxaca, Veracruz, Tabasco, Yucatán), hasta sitios tan lejanos como Chiapas y Guatemala (Cobean, 2002). Los análisis hechos por Boksenbaum *et al.* (1987) señalan que, en el Formativo temprano (1100-900 a.C.), las regiones de Zinapécuaro



● Fig. 1 Ubicación geográfica de cinco de los yacimientos de obsidiana estudiados.

y El Paredón eran los principales yacimientos de las primeras navajas prismáticas en la cuenca de México. La geología de la región Ucareo-Zinapécuaro es compleja e incluye tres afloramientos de obsidiana que se formaron en distintos fechos entre 1 y 1.6 millones de años (Nelson y Healan, 1995); cada afloramiento se identifica con un nombre distinto: Zinapécuaro, Cruz Negra y Ucareo. Los análisis de obsidiana llevados a cabo en el reactor de la Universidad de Missouri han mostrado que existen grandes dife-

rencias en la composición de elementos traza de los tres flujos (Glascok *et al.*, 1998; Glascok *et al.*, 2007). El flujo de Ucareo ya ha sido ampliamente muestreado y químicamente caracterizado por Healan (1997), y en el flujo de Cruz Negra no se han hallado antiguas zonas de extracción, por lo que sería más relevante trabajar ahora el flujo de Zinapécuaro. El flujo de obsidiana de Zinapécuaro se halla directamente dentro y al sur de la población que lleva el mismo nombre, al noroeste del Estado de Mi-

choacán. Sus coordenadas UTM centrales son 14 309448 m Este y 2197202 m Norte, a una altura de 1880 msnm. La obsidiana de esta región es gris oscura translúcida y suele presentar bandas grises finas paralelas, aunque en ocasiones tiene una textura nubosa sin bandas.

El yacimiento de El Paredón, estado de Hidalgo, tiene un área aproximada de 30 km² (Cobean, 2002). Sus coordenadas UTM centrales son 14 575861 m E y 2198729 m N. La región de El Paredón tiene una secuencia volcánica representada por flujos dacíticos, brechas con clastos riolíticos y vidrios, con una edad de entre los 3.0 y 0.24 millones de años (García-Palomo *et al.*, 2002). Las navajillas prismáticas más antiguas de Mesoamérica, encontradas en diferentes sitios olmecas del Formativo temprano, provienen de este yacimiento (Cobean *et al.*, 1971). Estas minas continuaron funcionando hasta el Posclásico tardío (1521 d.C.). Análisis previos de elementos traza con el método de XRF no pudieron distinguir entre los yacimientos de Otumba y El Paredón (Charlton *et al.*, 1978; Cobean, 2002).

Muy poco se sabe aún sobre la importancia de las minas de Zacualtipán (estado de Hidalgo) para las redes comerciales de obsidiana en Mesoamérica. No obstante, estudios geoquímicos hechos con la técnica de activación neutrónica muestran la amplia distribución geográfica de artefactos producidos aquí en los periodos del Clásico tardío y el posclásico, cubriendo las zonas de Guatemala y los estados de Chiapas, Oaxaca, Morelos e Hidalgo (Cobean, 2002; Mandujano *et al.*, 2002). El yacimiento de Zacualtipán cubre un área mínima de 60 km² y sus coordenadas UTM centrales son 14 540863 m E y 2278191 m N. Aunque se realizaron investigaciones previas sobre este depósito geológico (*op. cit.*), aún son pocas las investigaciones que hay sobre esta región, por lo que resulta más importante su caracterización química por medio de técnicas de alta resolución.

La obsidiana del yacimiento de Tulancingo empezó a ser explotada hace 9000 años aproximadamente, aunque el periodo de mayor extracción minera parece darse entre el 750 y el 900 d.C., teniendo una amplia distribución en

el centro de México (Cobean, 2002). Generalmente es de color negro o gris opaco, encontrándose también con un tinte verdoso. El complejo más grande de minas prehispánicas es El Pizarrín y comienza cerca del extremo sur de Huapalcalco, en las laderas del cerro Tecolote, en las afueras al NW del poblado de Tulancingo, estado de Hidalgo. Sus coordenadas UTM centrales son 14 567917 m E y 2222747 m N, a una altura de 2186 msnm. Otra fuente importante dentro de esta región es llamado Rancho Tenango y se encuentra a 4 km al SE del centro de Tulancingo. La mayoría de los artefactos procedentes de sus talleres consistían en bifaciales y unifaciales, con poca evidencia de producción de navajas prismáticas.

La Sierra de Pachuca en el estado de Hidalgo (también conocida como Sierra de las Navajas) encierra el depósito de obsidiana más grande del centro de México (con un área aproximada de 150 a 200 km²) iniciándose su explotación miles de años antes de la conquista española; aquí se produce una fina obsidiana de color verde, única en toda América Central. Su limpia fractura concooidal y su casi total ausencia de cristales la hacen ideal para la manufactura de artefactos. Las Navajas es un centro volcánico riolítico per-alcalino ya extinto, cuya formación se dio en dos momentos geológicos principales (López *et al.*, 1989): la porción oriental está conformada por conos y domos volcánicos del Plioceno tardío, con una composición andesítica-riolítica; la porción occidental pertenece al Plioceno, periodo en que se formaron las estructuras más grandes, con una composición andesítica-dacítica. Sus coordenadas UTM centrales son 14 545107 m E y 2219682 m N. La obsidiana se presenta en dos formas, como parte de un flujo de lava (varios de estos flujos ocurrieron en el Plioceno) o en bloques arrastrados hacia los barrancos por los colapsos de tierra. Ambas formas se utilizaron para manufacturar diferentes artefactos por parte de las civilizaciones prehispánicas más importantes: Teotihuacan, Tula y Tenochtitlan. Algunas investigaciones han sugerido incluso que la expansión política y económica de estas culturas se debió al control de esta fuente de obsidiana (Cobean, 2002; Sant-

ley *et al.*, 1986). Su explotación se facilitó debido a que los bloques de obsidiana dentro del caparazón del flujo se encuentran embebidos en una matriz deleznable.

En esta región se registraron cuatro flujos importantes de obsidiana (Lighthart, 2004). El primero y más antiguo es el flujo Guajolote al sudoeste de la Sierra, seguido por el depósito del flujo Las Minas, que contiene obsidiana verde limpia en los flancos oeste y sur. Hacia los 2 Ma se produce una catastrófica avalancha debida al colapso del flanco norte del volcán, así como fuertes explosiones provocadas por la exposición de la cámara magmática. Posteriormente, el flujo Ixatla (de obsidiana gris bandeada) llena parte del anfiteatro colapsado hacia sus porciones central y sur. Por último, el complejo eruptivo de El Horcón (de obsidiana gris y café, rica en cristales pero inservible para la talla) terminó de rellenar el cráter, fluyendo hacia sus costados norte, este y oeste, formando los actuales picos más altos de Las Navajas. Dentro de esta región se encuentran puntos de extracción prehispánicos que abarcan varios de sus flancos; entre los más importantes están los conocidos como El Durazno (relacionado por algunos como El Nopalillo), El Sembo, Cruz del Milagro, Rancho El Guajolote y Oyamental. Sin embargo, de acuerdo con los pobladores locales, existen más minas de obsidiana a lo largo de las laderas de Las Navajas todavía por ser descubiertas, estudiadas o descritas, incluyendo minas a lo largo de los flancos central y occidental de la Sierra (Lighthart, 2004). Se cree que el control de la explotación de cada una de estos puntos se puede asociar a diferentes culturas prehispánicas (por ejemplo, Cruz del Milagro y el Sembo a Teotihuacan, mientras que El Durazno podría estar más ligado a la cultura Mexica), por lo que su diferenciación geoquímica nos daría marcadores culturales importantes.

Métodos analíticos

El objetivo principal de la investigación consiste en realizar análisis químicos de los elementos traza de muestras, procedentes de las minas pre-

hispanicas más importantes de yacimientos de obsidiana del centro de México: la Sierra de las Navajas, Zinapécuaro, Otumba, Tulancingo, El Paredón y Zacualtipán. El propósito consistió en obtener datos de las concentraciones de elementos químicos que los caracterizan e identifican tanto a nivel regional como intrarregional y comprobar la factibilidad de su clasificación y diferenciación por medio de técnicas estadísticas novedosas (DBSCAN), de forma que en estudios futuros se obtengan, de una forma automatizada, correlaciones genéticas entre artefactos de obsidiana procedentes de diversos sitios arqueológicos de México con sus yacimientos originales. La meta final es obtener una caracterización geoquímica lo más completa y precisa posible de los yacimientos de obsidiana estudiados, así como de sus subfuentes. Esto permitirá a ulteriores investigaciones hacer estudios de procedencia de sus artefactos y poder determinar de forma confiable relaciones comerciales entre diferentes culturas.

Dentro del proyecto que desarrollamos a largo plazo proponemos la utilización de varios instrumentos de análisis geoquímico para el estudio de obsidianas: fluorescencia de rayos X (XRF por sus siglas en inglés), ICP-MS, difracción de rayos X, espectrometría de plasma inducido por láser (LIBS) y geocronología K-Ar para obtener las edades del material fuente. En esta investigación sólo se presentarán los resultados obtenidos a través de los análisis de XRF e ICP-MS.

La fluorescencia de rayos X es una técnica de muestreo versátil y rápido que reconoce un gran número de elementos químicos (entre 25 y 30 simultáneamente) y presenta los resultados en tiempo real. En algunos casos favorables se logran unos límites de detección de hasta 0.002% (20 ppm). Consiste en irradiar la muestra con rayos X, provocando la expulsión de un electrón interno de los átomos presentes en la matriz. El electrón expulsado es sustituido por otro de una capa superior y este proceso genera la emisión de fotones de rayos X característicos de cada elemento presente. Puede detectar desde el sodio ($Z = 11$) hasta el uranio ($Z = 92$), en concentraciones cuyo orden de magnitud puede variar, en el Sistema Internacional de Unida-

des, desde las ppm (partes por millón o microgramos/gramo) hasta porcentajes. Lo más común es utilizarla para la determinación de elementos mayores, entre 100% y 0.1% de concentración en peso. Obviamente no tiene los mismos límites de detección del ICP ni su capacidad de detección de las tierras raras (*REE* por sus siglas en inglés), pero los elementos detectados nos permitirán integrar un mapa químico más completo de los yacimientos de obsidiana.

El análisis de RXF de nuestras muestras se llevó a cabo en el Instituto de Geología (UNAM) por la química Patricia Girón García, utilizando un espectrómetro secuencial de rayos X (Siemens SRS 3000) equipado con tubo de rodio y ventana de berilio de 125 micras, obteniendo una determinación de elementos mayores (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P) y elementos traza (Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Th y Pb) de las muestras de vidrio volcánico. Los errores estimados en las determinaciones fueron menores a 1% en elementos mayores y menores a 4% en elementos traza. En todos los casos las curvas de calibración se construyeron con estándares emitidos por instituciones de reconocido prestigio internacional.

El Espectrómetro de Masas de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-MS) se desarrolló en la década de 1980. Combina la tecnología del ICP con la certeza y el bajo límite de detección de un espectrómetro de masas, haciendo más fácil la introducción de muestras y más rápido el análisis (Jarvis *et al.*, 1996). La construcción del ICP se basó en los mismos principios físicos del espectrómetro de emisión atómica. Las muestras se descomponen en elementos atómicamente cargados dentro de un plasma de argón inducido por radio frecuencia, alcanzando los 6 000° K en su centro y los 8 000° K en su periferia y se analizan de acuerdo con el cociente de masa/carga (Potts, 1995). La muestra puede introducirse al plasma en un estado disuelto o vaporizado, dependiendo del modelo del instrumento. La alta energía termal del ICP y el ambiente rico en electrones transforma la mayoría de los átomos en iones y el cuadro-polo del espectrómetro de masas permite la de-

tección de los iones en cada una de sus masas en una secuencia rápida, propiciando que las señales isotópicas individuales de un elemento sean barridas (Jarvis *et al.*, 1995). Los límites de detección del ICP son menores en comparación con otros métodos instrumentales, generalmente en el orden de 1 ppb (partes por billón) para los elementos ligeros y de 50 ppt (partes por trillón) para los elementos pesados. El ICP es especialmente eficaz en la determinación del contenido de tierras raras en los materiales.

Para nuestro estudio, el análisis de ICP-MS lo hizo la maestra en ciencias Elena Lounejeva en las instalaciones del Laboratorio de Química Ultrapura (LABQUP), utilizando un espectrómetro de masas Agilent 7500 ce con celdas de colisión. El procedimiento de análisis se realizó a partir de disolución ácida de las muestras y de acuerdo con procedimientos analíticos modificados de Eggins *et al.* (1997). Con fines de aseguramiento de calidad, las muestras se analizaron en paralelo con cuatro materiales de referencia (BHVO-1, RGM-1, GSR-2 y SDO-1) utilizando los valores reportados por Govindaraju, K. (1994), así como un material de referencia de laboratorio (andesita IGLa-1, [Lozano y Bernal, 2005]) que permitió evaluar la precisión y exactitud de resultados. Los elementos analizados por medio de esta técnica fueron Be, Sc, V, Cr, Co, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Cs, Ba, REE (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), Hf, Ta, Th, U, Pb.

Tratamiento estadístico de los datos composicionales

En muchas ocasiones no es aconsejable procesar las variables tal y como se registraron, ya que muchas se encuentran expresadas en unidades diferentes (kilos, centímetros, etcétera), por lo que puede existir una mezcla de las escalas utilizadas en los datos o quizá se manejen variables de diferentes tipos, por ejemplo si son atributos discretos, de tipo categórico o de tipo continuo. Por esta razón es aconsejable llevar

las unidades a una métrica común en donde todas las variables tienen el mismo peso, sin que ninguna tienda a dar mayor ponderación en el análisis.

Una opción es la transformación de los valores en términos de unidades estándar, conocida también como estandarización. Las unidades estándar quedan definidas mediante la siguiente expresión:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \quad (1)$$

donde x_i corresponde al valor de cada observación en la muestra, \bar{x} se refiere a la media de la muestra y s_x es la desviación estándar de la muestra. Por definición, z tiene media 0 y varianza 1. Al aplicar esta transformación, todas las variables quedan expresadas como una función normal estándar, es decir con media 0 y desviación 1.

Por otro lado, los valores resultantes de las muestras analizadas suelen expresarse en términos de abundancias relativas, es decir, cuando la suma de todas las variables es igual al valor de unidad (1 o 100%). Debido a esta restricción, las variables individuales de los datos composicionales no pueden variar de forma independiente. En otras palabras, si la proporción de un componente se incrementa, la proporción del resto de los componentes deberá decrecer. Esta correlación inducida tiende a cancelar relaciones verdaderas entre las variables cuando éstas se expresan como fracciones de una suma (Kucera y Malmgren, 1998).

Para evitar el problema de la restricción de una suma constante, se puede aplicar una transformación logarítmica, propuesta por Aitchison (1982), a los datos que elimina la dependencia entre variables. En esta transformación, conocida en inglés como *logratio*, los datos se expresan como cocientes de logaritmos utilizando la siguiente expresión.

Dada una muestra en donde x_i corresponde a los porcentajes de los datos composicionales de cada observación, la transformación logratio puede expresarse como:

$$S^{tr} = \ln\left[\frac{x_1}{g}\right], \ln\left[\frac{x_2}{g}\right], \ln\left[\frac{x_3}{g}\right], \dots, \ln\left[\frac{x_N}{g}\right] \quad (2)$$

donde g corresponde a la media geométrica obtenida sobre cada renglón de la matriz. Esta media geométrica se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$g = \sqrt[N]{x_1 x_2 x_3 \dots x_N} \quad (3)$$

De esta manera, los datos originales se reemplazan por el logaritmo de los cocientes. Mediante esta transformación se retiene la estructura de covarianza en cualquier análisis de datos composicionales (Aitchison, 1982). En nuestra investigación, se realizaron pruebas con los datos representados en tres formas: datos originales, datos estandarizados y datos transformados por medio del logratio. Esto con el fin de comprobar si alguna de las tres formas proporcionaba mejores resultados o, en la práctica, arrojaban resultados equivalentes. Todas las matrices obtenidas se analizaron posteriormente por medio de un poderoso algoritmo de clasificación conocido como DBSCAN, el cual se explica brevemente a continuación.

En la actualidad existe una nueva vertiente de análisis de datos, surgida de lo que hoy en día se conoce como minería de datos, que extrae técnicas y herramientas de diferentes áreas incluyendo reconocimiento de patrones, aprendizaje de máquinas, estadística, sistemas de bases de datos, etcétera. El objetivo de la minería de datos consiste en auxiliar en el análisis de conjuntos de datos muy grandes y complejos. En general, la minería de datos se utiliza para descubrir relaciones subyacentes entre atributos en el conjunto de datos, detectar patrones similares o realizar clasificaciones y predicciones (Rushing *et al.*, 2004). Debido al grado de complejidad de los algoritmos de la minería de datos, entre los cuales se encuentran clasificadores de árbol, algoritmos genéticos y redes neuronales artificiales, es de suponer que las técnicas de agrupamiento rígido tiendan a desaparecer en poco tiempo para que estos nuevos métodos de análisis las reemplacen.

Dentro de esta nueva corriente se desarrollaron algunos métodos de partición. Uno de ellos opera bajo el principio de densidad que produce una partición de los datos, en la cual el algoritmo determina automáticamente el número de grupos. Dicho algoritmo se conoce como DBSCAN y localiza regiones de alta densidad de puntos separadas de otras regiones de baja densidad. El algoritmo DBSCAN lo propuso Ester *et al.* (1996). Este algoritmo es capaz de descubrir cúmulos con forma arbitraria, de determinar cúmulos que estén muy cercanos unos de otros y de detectar puntos que no pertenecen a ningún grupo, identificándolos como ruido o puntos aberrantes.

La ventaja del DBSCAN es su enorme flexibilidad. Primero, no requiere que el usuario proporcione el número de cúmulos a formarse, requisito indispensable para las técnicas de agrupamiento no jerárquicas. Segundo, puede detectar cúmulos que estén encerrados dentro de otro cúmulo, aunque estos no se encuentren conectados (fig. 2).

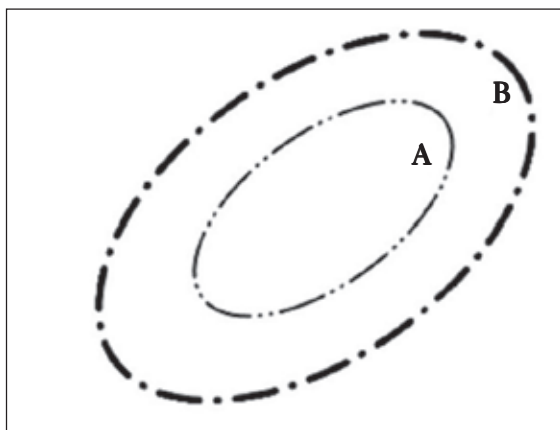
El algoritmo DBSCAN comienza con un punto arbitrario no visitado, que se selecciona de la masa de datos, determinando así la distancia entre dos puntos **q** y **p**. Se selecciona la distancia que corresponde a un cuartil del 95% de una distribución normal. La vecindad de este punto está determinada por un radio de distancia ϵ (epsilon), definido por el usuario. Si los puntos contenidos dentro de esta distancia son sufi-

cientos, se da origen a un cúmulo; de lo contrario, el punto se identifica como ruido. Más adelante, se calcula la distancia de cada objeto a su segundo vecino más próximo y así consecutivamente, ordenando de este modo las distancias. Resulta indispensable que para la formación de un cúmulo, exista en la vecindad del punto **q** un número mínimo de puntos vecinos. El ruido (puntos que no se pueden incluir en ningún grupo) se define como aquellos puntos **p** que no se encuentran contenidos dentro de la vecindad de **q** (Daszykowski *et al.*, 2001; Ester *et al.*, 1996).

En pruebas experimentales de datos sintéticos y datos reales, Ester *et al.* (1996) demostraron que el algoritmo de DBSCAN no presentaba variaciones en los análisis de diferentes bases de datos al tomar como constante a $MinPts = 4$. Además, DBSCAN resultó ser más efectivo en la búsqueda de cúmulos con formas arbitrarias que el muy bien conocido algoritmo de CLARANS, obteniendo un mejor desempeño en la tarea de búsqueda de cúmulos por un factor de 100 veces mayor que CLARANS.

Análisis y resultados

Se recolectaron un total de 63 muestras de obsidiana, de las cuales se seleccionaron las mejores de cada yacimiento; es decir, aquellos que eran de mejor calidad y contenían una menor cantidad de defectos (como la presencia de esferulitas y corteza). Las muestras se fragmentaron *in situ* para extraer el núcleo de un bloque de obsidiana, limpiándola de la corteza exterior y se guardaron en bolsas para su traslado al Instituto de Geología de la UNAM. Una cantidad aproximada de 50 g de cada muestra seleccionada se pulverizó en el taller de molienda del Instituto. Debido a la gran cantidad de muestras que se tenían para procesar, se utilizó un instrumento pulverizador con recipiente de acero; no se empleó el de tungsteno debido a los problemas de contaminación de la muestra (Vogt *et al.*, 1990). En total, se preparó para su análisis la siguiente cantidad de muestras por sitio: seis para Zinapécuaro, veinte para Sierra



● Fig. 2 El cúmulo A está completamente encerrado dentro del cúmulo B (obsérvese como éstos no se encuentran conectados). DBSCAN es capaz de detectar dos grupos.

de Pachuca (cinco por cada una de las cuatro zonas estudiadas), cinco para Zacualtipán, diez para Otumba (procedentes de las cercanías del Cerro de Soltepec), cinco para El Pizarrín-Tulancingo y siete para El Paredón-Tres Cabezas.

Las muestras se analizaron por medio de las técnicas físico-químicas mencionadas antes y acto seguido, sus resultados se procesaron de manera estadística. En todos los casos, los valores originales de los datos composicionales de cada muestra (figs. 3 y 4) se analizaron estadísticamente de la siguiente manera. Los valores en porcentaje dados a los compuestos mayores (óxidos) se multiplicaron por 10 000 para llevarlos a la misma unidad métrica que la de los elementos traza. Posteriormente, debido a la gran diferencia entre las magnitudes de los datos observados, los datos se estandarizaron. De esta forma, se convirtieron todas las unidades a términos de desviaciones estándar, garantizando así que todas las variables poseyeran el mismo peso dentro del análisis. Finalmente, se obtuvo el logratio de cada una de las muestras por el método arriba descrito.

Las tres matrices resultantes se analizaron de manera individual por medio del algoritmo DBSCAN. Para poder analizar los datos del contenido químico de la obsidiana se utilizó el programa *Weka* [<http://www.kdd.org/explorations/sigues/11-1-2009-07/p2V11n1.pdf>]. Este programa posee una extensa colección de algoritmos de máquinas de conocimiento desarrollados por la universidad de Waikato (Nueva Zelanda) e implementados en Java. Una ventaja de Weka es que contiene las herramientas necesarias para realizar transformaciones sobre los datos, tareas de clasificación, regresión, *clustering*, asociación y visualización. El módulo de clasificación contiene la rutina para poder correr el programa de DBSCAN. La licencia de Weka es GPL, lo que significa que este programa es de dominio público a través de su página Web.

En primer lugar, se analizaron las muestras de todos los yacimientos por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X, la cual nos permite determinar con precisión los elementos mayores (elementos que componen casi 100% de una muestra) y algunos traza (en *ppm* o par-

tes por millón). De esta forma seguiríamos una línea de investigación que va de lo general a lo particular. El objetivo consistía en probar los límites de detección desde los cuales se pudiesen obtener resultados confiables para diferenciar unos yacimientos de otros. La clasificación arrojada por el algoritmo DBSCAN para diferenciar las fuentes a nivel regional fue del 100% de los datos, colocándose cada una de las muestras en los seis grupos esperados y sin ningún elemento asignado como ruido (fig. 5). Esto nos indica que los diferentes yacimientos pueden discriminarse inclusive con bajos límites de detección, como sería la determinación de los elementos químicos mayoritarios (óxidos). Obviamente la clasificación se afina más cuando se incluyen los elementos traza de XRF.

La determinación química tanto de las fuentes regionales como de las fuentes intrarregionales puede resultar ventajosa para dividir en zonas y épocas la utilización de los mismos yacimientos, reconstruyendo así de una forma más acertada la historia de la explotación de los centros de extracción. Pero la técnica de XRF no mostró ser suficientemente resolutive para separar las fuentes a nivel local, como en el caso de las muestras recolectadas en diferentes puntos de la Sierra de las Navajas (figs. 6 y 7) para determinación de subfuentes. El ICP-MS es un método analítico muy efectivo para la determinación de tierras raras en obsidianas, de modo que se puede relacionar a los artefactos con sus yacimientos naturales, incluso proviniendo de depósitos cercanos. Por ello, se seleccionó como el método a seguir para el estudio de subfuentes. Así, se realizaron análisis usando inicialmente tres muestras de materia prima (Carballo *et al.*, 2007) tomadas de cada una de las cuatro áreas de extracción importantes de Sierra de las Navajas (fig. 4): Sembo (Ce), Cruz del Milagro (Cr), Oyamental (Oy) y El Durazno (Dz). El estudio del mapa geológico nos indica que estas áreas podrían estar ubicadas en diferentes flujos de obsidiana, por lo que la diferenciación geoquímica de cada una de ellas podría resultar positiva.

Analizando los datos por medio de la técnica DBSCAN obtenemos la formación de un solo gru-

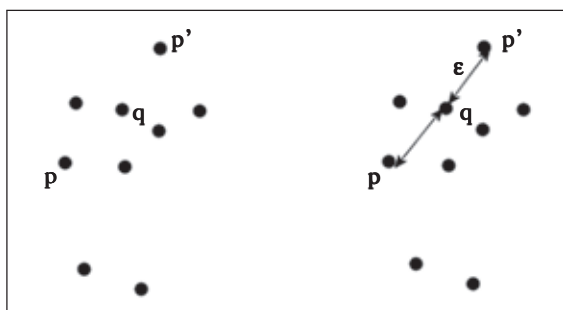
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	Suma
Muestras	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Ce-1	75.475	0.205	11.058	2.443	0.132	0.07	0.15	5.147	4.479	0.025	0.61	99.794
Ce-2	75.62	0.205	11.249	2.358	0.135	0.087	0.133	5.104	4.477	0.013	0.51	99.891
Ce-3	75.1	0.202	11.112	2.558	0.132	0.075	0.117	5.225	4.498	0.004	0.93	99.953
Ce-7	75.688	0.207	11.224	2.551	0.133	0.077	0.135	5.11	4.521	0.013	0.5	100.159
Ce-8	75.163	0.203	11.328	2.478	0.142	0.11	0.124	5.126	4.517	0.001	0.48	99.672
Cr-1	74.666	0.208	11.14	2.509	0.143	0.088	0.119	5.184	4.51	0.001	0.63	99.198
Cr-2	74.839	0.206	11.029	2.533	0.132	0.048	0.118	5.207	4.584	0.006	0.92	99.622
Cr-4	75.138	0.205	11.069	2.319	0.134	0.052	0.108	5.24	4.585	0.004	0.45	99.304
Cr-6	75.153	0.203	11.179	2.532	0.133	0.077	0.116	5.172	4.591	0.006	0.55	99.712
Cr-7	75.233	0.198	11.183	2.53	0.136	0.067	0.12	5.151	4.585	0.004	0.42	99.627
Dz-1	75.575	0.197	10.898	2.535	0.126	0.072	0.127	5.247	4.645	0.006	0.48	99.908
Dz-2	75.336	0.206	11.08	2.534	0.134	0.053	0.115	5.224	4.617	0.007	0.54	99.846
Dz-3	75.3	0.204	11.165	2.505	0.135	0.093	0.11	5.197	4.593	0.005	0.58	99.887
Dz-4	75.09	0.204	11.051	2.628	0.136	0.099	0.119	5.157	4.575	0.004	1.02	100.083
Dz-5	75.49	0.213	10.799	2.516	0.124	0.066	0.123	5.156	4.641	0.003	0.55	99.681
Oy-1	75.122	0.204	11.035	2.521	0.133	0.067	0.118	5.096	4.557	0.006	0.49	99.349
Oy-2	75.159	0.199	10.947	2.553	0.132	0.093	0.116	5.045	4.542	0.001	1.33	100.117
Oy-3	75.649	0.21	11.072	2.531	0.129	0.062	0.127	5.264	4.586	0.007	0.52	100.157
Oy-4	75.51	0.207	11.077	2.478	0.135	0.053	0.117	5.141	4.565	0.005	0.48	99.768
Oy-5	75.787	0.207	10.877	2.568	0.125	0.046	0.119	5.228	4.641	0.005	0.44	100.043
Za-3	74.546	0.23	12.595	1.751	0.017	0.182	0.711	3.509	5.499	0.028	0.86	99.928
Za-4	76.046	0.218	12.19	1.617	0.006	0.154	0.669	3.418	5.614	0.024	0.24	100.196
Za-6	75.399	0.217	12.375	1.676	0.004	0.163	0.713	3.495	5.588	0.025	0.32	99.975
Za-9	75.242	0.224	12.534	1.702	0.026	0.247	0.718	3.457	5.442	0.029	0.35	99.971
Za-10	74.949	0.231	12.722	1.689	0.017	0.262	0.719	3.521	5.464	0.03	0.52	100.124
Par1	76.14	0.147	12.193	1.35	0.039	0.101	0.359	4.111	5.007	0.008	0.18	99.635
Par2	75.875	0.146	12.241	1.321	0.04	0.09	0.371	4.053	4.995	0.011	0.4	99.543
Par4	75.79	0.141	12.388	1.321	0.046	0.129	0.37	4.044	4.963	0.007	0.24	99.439
Par6	75.953	0.14	12.28	1.33	0.033	0.084	0.362	4.057	5.046	0.008	0.33	99.623
Par7	75.871	0.139	12.186	1.339	0.044	0.09	0.367	4.125	4.985	0.012	0.38	99.538
Par9	76.433	0.151	11.917	1.298	0.032	0.073	0.377	3.931	5.069	0.009	0.26	99.55
Par10	76.248	0.15	12.083	1.29	0.035	0.08	0.366	4.006	5.042	0.009	0.31	99.619
Tul1	74.098	0.196	12.049	2.834	0.044	0.092	0.533	5.072	4.502	0.012	0.19	99.622
Tul2	74.153	0.194	12.202	2.849	0.039	0.039	0.519	4.843	4.551	0.008	0.2	99.597
Tul3	74.268	0.192	12.456	2.847	0.052	0.063	0.514	4.789	4.558	0.01	0.12	99.869
Tul4	74.34	0.196	12.57	2.892	0.05	0.12	0.544	4.848	4.512	0.013	0.22	100.305
Tul5	74.262	0.19	12.191	2.849	0.042	0.016	0.505	4.767	4.575	0.008	0.22	99.625
Zin1B	76.399	0.05	12.524	1.009	0.02	0.05	0.494	4.046	4.702	0.009	0.99	100.293
Zin1C	76.325	0.055	12.372	1.103	0.016	0.049	0.577	4.002	4.703	0.009	0.61	99.821
Zin2A	76.442	0.049	12.308	1.063	0.013	0.026	0.5	3.995	4.768	0.004	0.37	99.538
Zin2C	76.567	0.049	12.176	1.123	0.016	0.035	0.494	3.92	4.727	0.012	0.46	99.579
Zin3A	76.57	0.05	12.282	1.057	0.01	0.035	0.509	3.986	4.779	0.007	0.24	99.525
Zin3B	76.263	0.053	12.436	0.987	0.021	0.106	0.514	4.177	4.714	0.013	0.22	99.504
Ot1	74.529	0.168	13.532	1.398	0.035	0.245	1.156	4.193	4.194	0.042	0.14	99.632
Ot2	74.449	0.167	13.45	1.406	0.039	0.238	1.171	4.199	4.163	0.046	0.25	99.578
Ot3	74.335	0.159	13.465	1.372	0.041	0.268	1.13	4.193	4.201	0.044	0.16	99.368
Ot4	74.216	0.168	13.581	1.377	0.048	0.255	1.152	4.168	4.143	0.044	0.17	99.322
Ot5	74.571	0.161	13.816	1.354	0.041	0.265	1.105	4.12	4.222	0.041	0.23	99.926
Ot6	73.984	0.155	13.275	1.343	0.044	0.237	1.082	4.229	4.198	0.039	1.45	100.036
Ot7	74.147	0.152	13.471	1.452	0.044	0.241	1.1	4.126	4.185	0.042	0.45	99.41
Ot8	74.522	0.161	13.459	1.429	0.044	0.238	1.105	4.079	4.162	0.04	0.24	99.479
Ot9	74.434	0.16	13.648	1.38	0.039	0.235	1.089	4.158	4.207	0.04	0.27	99.66
Ot10	74.363	0.147	13.67	1.363	0.054	0.278	1.094	4.018	4.139	0.04	0.39	99.556

	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
Muestras	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Ce-1	259	2	15	103	1053	85	11	34	7	6	4	262	29	29
Ce-2	251	2	12	97	1003	74	5	26	6	6	4	264	27	30
Ce-3	255	1	19	100	1022	77	5	31	7	7	4	264	28	30
Ce-7	257	2	18	102	1052	83	10	24	7	8	2	262	28	29
Ce-8	257	2	13	102	1056	84	6	19	7	8	4	263	27	30
Cr-1	256	2	13	102	1039	83	6	24	7	8	4	264	26	30
Cr-2	261	2	15	101	1036	80	8	30	7	8	2	279	28	29
Cr-4	259	2	14	102	1054	84	7	33	7	7	3	264	27	29
Cr-6	257	2	14	101	1048	80	5	26	7	11	5	262	26	30
Cr-7	257	1	18	101	1042	78	5	25	7	11	3	263	28	31
Dz-1	256	2	9	102	1047	80	5	25	7	10	4	263	28	30
Dz-2	253	1	11	100	1045	80	5	24	6	11	5	258	28	28
Dz-3	258	2	20	102	1053	81	6	23	7	11	4	263	29	29
Dz-4	258	1	17	102	1059	82	6	25	7	11	5	262	29	28
Dz-5	254	1	3	99	1029	75	9	26	7	10	5	262	27	28
Oy-1	257	2	13	102	1045	80	5	35	7	8	3	262	30	29
Oy-2	255	2	7	101	1041	80	7	47	7	8	5	262	28	28
Oy-3	256	2	16	100	1024	77	6	34	7	8	4	265	28	29
Oy-4	251	1	16	98	1008	73	5	20	6	7	4	260	27	28
Oy-5	246	2	7	95	987	69	5	32	6	8	5	260	25	27
Za-3	290	40	289	68	244	16	9	41	7	5	6	40	38	24
Za-4	296	34	272	68	231	15	10	39	7	6	6	38	39	24
Za-6	292	37	274	69	239	16	6	39	7	6	8	38	39	24
Za-9	290	39	282	67	242	15	11	38	7	6	6	39	40	24
Za-10	290	38	288	68	243	15	10	36	7	8	6	38	39	24
Par1	179	4	61	55	227	37	5	51	6	8	6	65	19	21
Par2	176	4	67	53	218	35	5	39	6	7	4	65	19	20
Par4	178	4	60	54	229	37	5	71	6	7	6	63	19	18
Par6	171	5	65	50	215	33	5	35	5	7	5	63	19	20
Par7	179	5	60	55	233	39	7	25	5	7	6	65	19	20
Par9	173	4	58	53	214	32	6	27	6	7	6	62	19	19
Par10	182	5	65	57	239	40	5	31	7	7	7	64	20	21
Tul1	150	13	823	75	741	44	5	34	4	6	4	214	16	21
Tul2	151	14	806	75	745	46	5	30	4	7	4	215	16	24
Tul3	151	14	810	74	752	47	5	29	3	7	5	213	16	25
Tul4	150	13	801	73	727	45	5	32	3	7	5	214	16	22
Tul5	146	13	817	70	725	43	5	26	3	7	4	212	17	23
Zin1B	202	5	32	45	110	15	6	34	6	6	9	42	19	20
Zin1C	190	5	33	42	109	14	5	33	6	6	10	41	18	19
Zin2A	199	6	35	44	115	16	5	33	6	6	8	43	20	21
Zin2C	197	5	45	44	115	17	5	29	6	5	10	43	19	20
Zin3A	196	6	35	44	113	15	7	39	6	6	8	42	18	19
Zin3B	199	5	29	45	114	16	5	44	7	6	9	43	18	21
Ot1	130	136	810	29	160	12	10	34	6	6	4	47	13	21
Ot2	132	136	800	29	159	12	7	41	7	6	5	50	11	21
Ot3	122	107	789	26	138	8	7	50	6	6	5	49	10	19
Ot4	130	132	798	29	158	12	5	38	6	6	5	46	12	22
Ot5	130	122	808	29	152	11	5	31	6	6	5	49	11	20
Ot6	128	119	806	28	140	10	8	55	6	6	5	45	11	21
Ot7	130	121	780	29	144	10	9	43	6	5	5	47	12	21
Ot8	133	126	785	30	154	13	5	50	7	6	5	45	11	19
Ot9	127	104	780	27	136	8	7	36	6	6	5	46	11	19
Ot10	124	99	773	27	137	8	7	33	6	6	6	44	10	18

● Fig. 3 Valores originales obtenidos para las muestras de los seis yacimientos de obsidiana por medio de FRX:
 Ce = Sembo, Cr = Cruz del Milagro, Dz = Durazno, Oy = Oyamental, Za = Zacualtipán, Par = Paredón,
 Tul = Tulancingo-Pizarrín, Zin = Zinapécuaro, Ot = Otumba-Soltepec

	Li	Be	Sc	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
Muestras	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
CE-1	48.67	10.25	10.68	5.10	31.4	2.86	1.63	186.10	173.86	1.95	97.00	905.25	81.16
CE-3	48.10	10.21	7.78	4.93	27.7	1.39	1.47	181.30	170.92	1.99	94.39	879.19	78.75
CE-8	54.93	11.43	9.98	5.23	22.9	1.24	1.46	200.61	185.87	2.14	105.57	982.02	87.77
CR-1	48.43	10.31	8.22	4.68	26.0	1.43	1.82	186.22	176.39	2.00	97.80	896.97	80.14
CR-4	54.26	11.51	6.69	5.58	32.3	1.49	1.61	210.50	193.45	2.27	108.76	1016.58	91.19
CR-7	49.47	10.50	7.46	5.02	29.9	1.59	1.47	193.09	177.28	2.10	100.47	930.45	83.71
OY-1	49.61	10.69	4.49	5.28	37.5	1.63	1.65	193.82	180.70	2.20	100.23	927.08	83.99
OY-4	49.68	10.52	5.13	5.19	20.7	1.20	1.57	193.92	180.54	2.05	101.09	942.07	84.08
OY-5	50.10	10.58	7.27	5.26	33.4	1.54	1.57	195.47	182.77	2.10	101.67	940.09	83.60
DZ-1	51.64	10.93	8.57	5.10	26.1	1.44	1.56	201.12	187.21	2.13	105.92	972.26	86.94
DZ-4	46.22	9.69	3.96	4.84	25.83	0.11	1.38	1.53	178.85	165.68	1.89	94.08	861.61
DZ-5	46.08	9.89	6.69	4.65	25.2	1.53	1.43	177.68	168.64	1.93	93.63	872.44	77.88
DZ-5	47.74	10.11	6.66	4.90	25.6	1.46	1.46	188.09	175.29	2.00	97.96	903.23	81.26
	Mo	Cd	Sn	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
CE-1	5.15	0.24	5.86	0.23	4.09	17.62	38.29	83.55	10.76	39.20	10.33	1.88	11.18
CE-3	6.21	0.22	5.75	0.23	3.98	16.63	37.14	82.02	10.35	38.33	10.11	1.82	10.98
CE-8	4.84	0.25	6.63	0.26	4.40	17.46	41.04	90.35	11.47	41.73	10.97	2.03	12.32
CR-1	3.16	0.24	5.84	1.09	4.14	17.40	38.15	84.04	10.68	39.25	10.28	1.88	11.22
CR-4	7.18	0.26	6.59	0.25	4.55	18.27	42.39	92.85	11.79	43.03	11.25	2.06	12.44
CR-7	5.27	0.24	6.07	0.24	4.22	17.36	39.50	87.49	11.08	40.79	10.75	1.95	11.69
OY-1	6.78	0.22	6.09	0.23	4.19	17.31	39.75	87.21	11.01	40.36	10.47	1.91	11.56
OY-4	6.30	0.22	6.14	0.23	4.27	17.71	39.90	87.16	11.12	40.61	10.80	1.94	11.68
OY-5	6.80	0.22	6.10	0.25	4.32	17.51	40.11	88.10	11.15	40.91	10.70	1.96	11.58
DZ-1	3.53	0.24	6.35	0.24	4.50	18.38	41.50	90.84	11.51	42.32	11.11	2.01	12.14
DZ-4	77.71	6.30	0.20	5.63	0.22	3.96	17.12	37.06	81.78	10.27	38.00	9.98	1.79
DZ-5	4.47	0.19	5.71	0.21	3.99	16.44	36.79	81.12	10.33	38.03	9.99	1.85	10.87
DZ-5	4.97	0.21	5.96	0.22	4.21	17.14	38.77	85.59	10.85	39.98	10.63	1.93	11.37
	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
CE-1	2.32	17.06	3.57	11.58	1.92	12.71	2.02	27.59	5.29	29.16	20.41	6.95	
CE-3	2.28	16.59	3.50	11.28	1.88	12.40	1.99	27.11	5.27	28.64	19.92	6.84	
CE-8	2.52	18.48	3.84	12.34	2.02	13.48	2.18	29.55	5.58	30.26	21.13	7.34	
CR-1	2.33	17.05	3.61	11.71	1.92	12.82	2.02	27.53	5.27	29.21	20.45	7.00	
CR-4	2.53	18.55	3.87	12.52	2.05	13.61	2.17	29.37	5.68	30.64	21.25	7.32	
CR-7	2.41	17.58	3.71	12.10	2.00	13.12	2.11	28.56	5.51	30.11	21.06	7.16	
OY-1	2.41	17.51	3.66	11.80	1.96	13.06	2.08	28.20	5.46	29.88	20.74	7.15	
OY-4	2.43	17.67	3.72	11.94	1.98	13.12	2.08	28.19	5.42	29.84	20.84	7.08	
OY-5	2.39	17.56	3.68	12.06	1.98	13.20	2.11	28.40	5.45	29.81	20.76	7.13	
DZ-1	2.51	18.19	3.82	12.40	2.04	13.67	2.18	29.42	5.66	30.74	21.57	7.38	
DZ-4	10.84	2.25	16.51	3.48	11.33	1.86	12.43	1.98	27.04	5.23	28.82	19.86	
DZ-5	2.27	16.65	3.47	11.26	1.87	12.50	1.97	26.77	5.20	28.49	19.91	6.82	
DZ-5	2.36	17.38	3.66	11.82	1.95	12.93	2.07	28.03	5.40	29.76	20.86	7.07	

● Fig. 4 Valores originales obtenidos para las muestras de obsidiana procedentes de la Sierra de Pachuca por medio de ICP-MS.

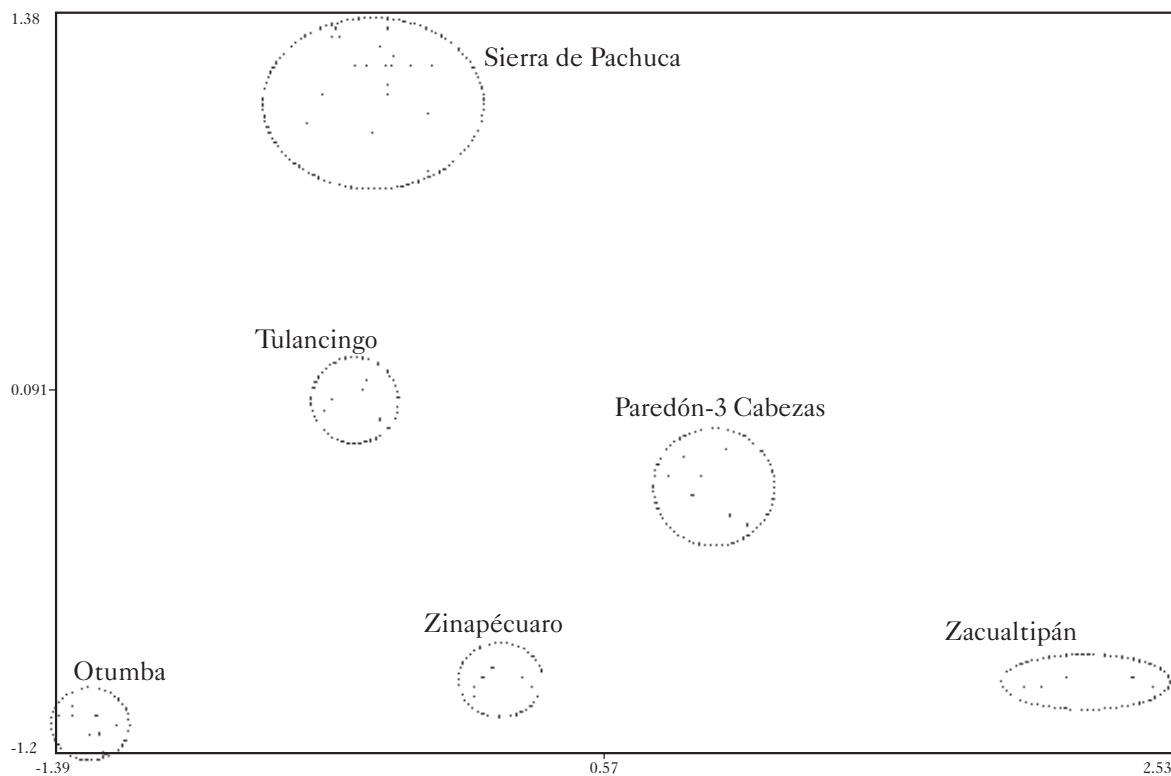


● Fig. 5 Puntos centrales (q), puntos frontera (p, p') y parámetro de búsqueda ϵ .

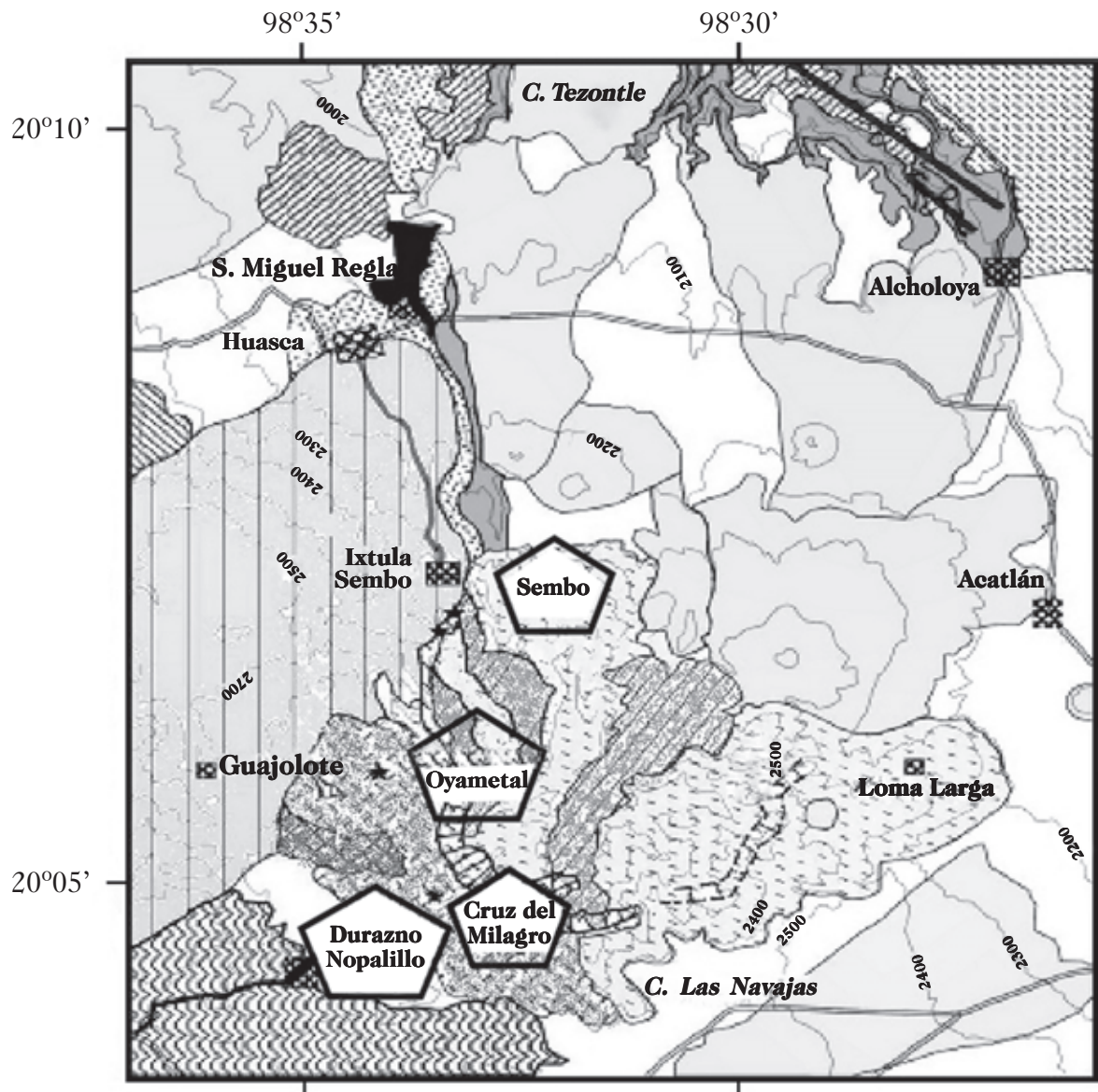
po (fig. 8), con la presencia de dos elementos de ruido (una muestra procedente de Cruz del Milagro y otra procedente del Durazno). Esto nos lleva a dos conclusiones: o todas las muestras proceden del mismo flujo volcánico o los flujos son químicamente tan similares que no se pueden diferenciar incluso con instrumentos de alta resolución como el ICP-MS. En cuanto a los elementos denotados como ruido, es decir ele-

mentos que no pertenecen al grupo pero que tampoco forman un grupo en sí, se considera que estos datos podrían estar contaminados. El grado de contaminación añadido a las muestras no es tan grande puesto que, al incrementar la distancia ϵ de 0.9 a 1.5, estas muestras se incluyen dentro del grupo único. Aún así, en el gráfico sí se puede observar cierta separación entre estos elementos y el resto del grupo, por lo que se deben manejar con cautela.

En cuanto al uso de las diferentes matrices de datos en el análisis estadístico de las muestras, se puede concluir lo siguiente. En el caso de muestras procedentes de diferentes regiones, con composición química muy diferente, el uso de la matriz de datos originales, estandarizados o transformados logarítmicamente, es indistinto (todas proporcionan los mismos resultados). En el caso de muestras procedentes de una misma región (con una composición química estrechamente similar), la introducción de la matriz original y la matriz estandarizada proporciona



● Fig. 6 Cúmulos formados por el algoritmo DBSCAN de los valores transformados con log-ratio, obtenidos a través del análisis por XRF de las muestras procedentes de los seis yacimientos de obsidiana.



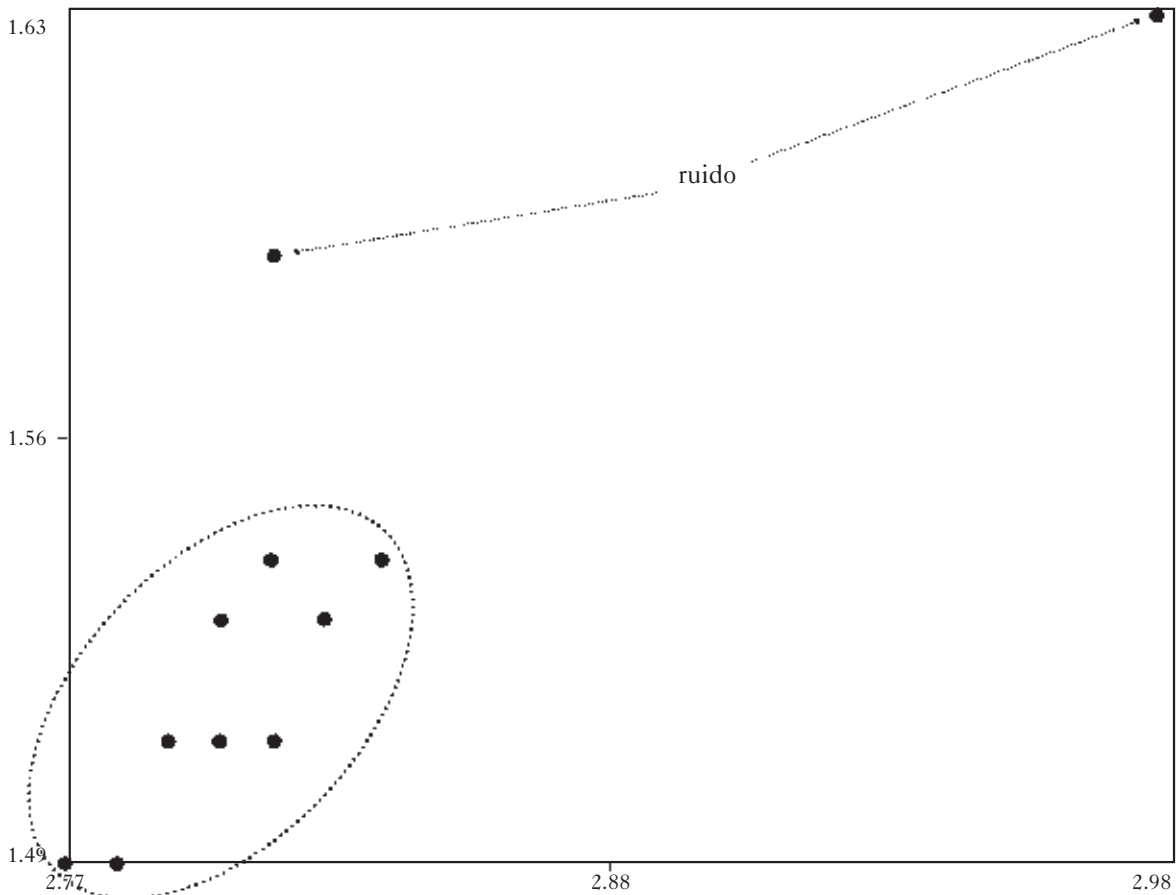
● Fig. 7 Localización de los cuatro puntos de recolección de muestras (pentágonos) dentro del marco geológico de la Sierra de Pachuca (modificado de Lighthart, 2004).

resultados equivalentes en la clasificación de los datos, pero se observa una mejoría en la clasificación con el uso de la matriz de datos transformados por el logratio. Esto quedó determinado por el hecho de que los datos transformados requieren un radio *epsilon* (ϵ) menor que los datos originales o estandarizados. Por ejemplo, en las muestras de Sierra de las Navajas, los datos transformados requirieron una $\epsilon = 0.8$ para obtener una buena clasificación mientras que los datos originales y/o estandarizados requirieron

una $\epsilon = 1.9$ (cabe mencionar que el intervalo de valores de ϵ va de 0.1 a 3.0). Esto probablemente se deba a que la transformación de los datos elimina la dependencia de las variables, sobre todo de valores muy cercanos.

Conclusiones

La obsidiana representa uno de los pilares en las estructuras económicas y culturales de las civili-



● Fig. 8 Cúmulos formados por el algoritmo DBSCAN de los valores transformados con log-ratio, obtenidos a través del análisis por ICP-MS de las muestras procedentes de cuatro áreas de extracción conocidas en la Sierra de Pachuca (cima de Cruz del Milagro, El Durazno, Oyametel y Sembo).

zaciones prehispánicas. Como Neivens *et al.* (1989: 58) escribieron: “La micro-procedencia ofrece al arqueólogo una herramienta para ver más allá de las rutas de intercambio y hacia los procesos de orden económico y social”. En México son pocos los investigadores que han realizado estudios de este tipo y los que los han hecho sólo se han limitado a unos pocos métodos. Es por eso que una caracterización a profundidad de los yacimientos más importantes del centro de México, aplicando distintas técnicas geoquímicas, tiene gran relevancia para los estudios de procedencia actuales y futuros. Este tipo de aplicaciones puede permitir la inferencia de las relaciones culturales y los intercambios comerciales que existían entre las diferentes y distantes civilizaciones mesoamericanas.

Nuestros estudios mostraron que la identificación de los yacimientos a macroescala a través de análisis geoquímicos es sumamente efectiva, incluso con instrumentos no tan resolutivos y más económicos como es XRF. Por desgracia, la identificación de subfuentes no proveyó resultados tan firmes como los anteriores, incluso con el uso de técnicas de tan bajo límite de detección (partes por billón) como es el ICP-MS. Esto no desestima el valor de la técnica como auxiliar poderoso en el análisis químico de materiales de interés arqueológico. Por otro lado, la técnica estadística de DBSCAN ofrece resultados más eficientes y confiables que los obtenidos con otros métodos de clasificación comúnmente utilizados, como el análisis discriminante, puesto que no sesga los datos mediante el uso de variables nominales. Además, proporciona un méto-

do automatizado de visualización de todos los gráficos cruzados de posibles combinaciones de los elementos que se analizan, permitiendo evaluar con rapidez los elementos químicos más útiles en la determinación de grupos.

Este artículo muestra parte del gran potencial que los métodos analíticos tienen para la caracterización química de los yacimientos de obsidiana y su contribución en la identificación confiable de la procedencia de artefactos arqueológicos de este material.

Bibliografía

- Aitchison, J.
1982. "The Statistical Analysis of Compositional data", en *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, vol. 44, núm. 2, pp. 139-177.
- Boksenbaum M. W., P. Tolstoy, G. Harbottle, J. Kimberlin y M. Neivens
1987. "Obsidian Industries and Cultural Evolution in the Basin of Mexico before 500 B.C.", en *Journal of Field Archaeology*, núm. 14, pp. 65-75.
- Cann, J. y C. Renfrew
1964. "The Characterization of Obsidian and its Application to the Mediterranean Region", en *Proceedings of the Prehistoric Society*, núm. 30, pp. 111-133.
- Carballo D. M., J. Carballo y H. Neff
2007. "Formative and Classic Period Obsidian Procurement in Central Mexico: A Compositional Study Using Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry", en *Latin American Antiquity*, vol. 18, núm. 1, pp. 27-43.
- Clark, J.
1989. "The Distribution of Obsidian", en Voorheis V. (ed.), *Ancient Trade and Tribute: economies of the Soconusco Region of Mesoamerica*, Salt Lake City, University of Utah Press, pp. 268-284.
- Charlton T.H., D.C. Grove y P.K. Hopke
1978. "El Paredón Mexico, Obsidian Source and Early Formative Exchange", en *Science*, núm. 201, pp. 807-809.
- Cobean R.H.
2002. *A World of Obsidian: the Mining and Trade of a Volcanic Glass in Ancient Mexico*, México, INAH/ Universidad de Pittsburgh.
- Cobean R.H., M.D. Coe, E.A. Perry y D.P. Kharkar
1971. "Obsidian Trade at San Lorenzo Tenochtitlan, Mexico", en *Science*, núm. 174, pp. 666-671.
- Cobean, R.H., J.R. Vogt, M.D. Glascock y T.R. Stocker
1991. "High Precision Trace Elements Characterization of Major Mesoamerican Obsidian Sources and Further Analyses of Artifacts from San Lorenzo Tenochtitlan, Mexico", en *Latin American Antiquity*, vol. 2, núm. 1, pp. 69-91.
- Daszykowski M., B. Walczak, D.L. Massart
2001. "Looking for Natural Patterns in Data: Part 1. Density-Based Approach", en *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, núm. 56, pp. 83-92.
- Eggins S.M., J.D. Woodhead, L.P.J. Kinsley, G.E. Mortimer, P. Sylvester, M.T. McCulloch, J.M. Hergt y M.R. Handler
1997. "A Simple Method for the Precise Determination of ≥ 40 Trace Elements in Geological Samples by ICP-MS Using Enriched Isotope Internal Standardization", en *Chemical Geology*, vol. 134, núm. 4, pp. 311-326.
- Ester, M., H-P. Kriegel, J. Sander y X. Xu
1996. "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise", en *Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*, pp. 48-66.
- García-Palomo, A., J. L. Macías, G. Tolson, G. Valdez y J. C. Mora
2002. "Volcanic Stratigraphy and Geological Evolution of the Apan Region, East-Central Sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt", en *Geofísica Internacional*, vol. 41, núm. 2, pp. 133-150.
- Gaxiola, M.
1989. "Prólogo", en Gaxiola M. y Clark J. E. (eds.), *La Obsidiana en Mesoamérica*, México, INAH, pp. 7-12.
- Glascock M.D., G.E. Braswell y R. Cobean
1998. "A Systematic Approach to Obsidian Source Characterization", en S. Shackley (ed.),

Archaeological Obsidian Studies, Nueva York, Plenum Press, pp. 15-66.

- Glascock M.D., R.J. Spekman y H. Neff
2007. "Archaeometry at the University of Missouri Research Reactor and the Provenance of Obsidian Artifacts in North America", en *Archaeometry*, vol. 49, núm. 2, pp. 343-357.
- Granados, V.D., C.A. Pastrana, H.R. Sánchez, I.R. Martínez
1991. "Datos geoarqueológicos del yacimiento de obsidiana de Otumba, México", en *Expresión Antropológica*, vol. 2, núm. 9, pp. 31-39.
- Govindaraju, K.
1994. "Compilation of Working Values and Sample Description for 383 Standard Reference Materials", en *Geostandards Newsletter*, vol. 18, núm. 2, p. 331.
- Healan, D.M.
1997. "Prehispanic Quarrying in the Ucareo-Zinapécuaro Obsidian Source Area", en *Ancient Mesoamerica*, núm. 8, pp. 77-100.
- Hernández, Javier I.
2007. "Geología y geomorfología volcánica de la región de los yacimientos de obsidiana de Otumba en el sector Norte de la Sierra Nevada de México", tesis de licenciatura, México, Facultad de Filosofía y Letras-Colegio de Geografía-UNAM.
- Jarvis, K.E., A.L. Gray y R.S. Houk
1996. *Handbook of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*, Londres, Blackie Academic & Professional.
- Jiménez-Reyes M., D. Tenorio, R. Esparza-López, L. Cruz, C. Mandujano y S. Elizalde
2001. "Neutron Activation Analysis of Obsidian Quarries of the Central Quaternary Trans-Mexican Volcanic Axis", en *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 250, núm. 3, pp. 465-471.
- Kucera, Michal y Malmgren Björn A.
1998. "Logratio Transformation of Compositional Data: Resolution of the Constant Sum Constraint", en *Marine Micropaleontology*, núm. 34, pp. 117-120.
- Lighthart, A.
2004. "The Pachuca Obsidian Source, Hidalgo, Mexico: A Geoarchaeological Perspective", en *Geoarchaeology*, vol. 19, núm. 1, pp. 71-91.
- López F., R. Nieto y R. Cobean
1989. "La producción de obsidiana en la Sierra Las Navajas, Hgo.", en M. Gaxiola y J.E. Clark (eds.), *La obsidiana en Mesoamérica*, México, INAH, pp. 193-197.
- Lozano Santa-Cruz, R. y J.P. Bernal
2005. "Characterization of a New Set of Eight Geochemical Reference Materials for XRF Major and Trace Element Analysis", en *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, núm. 22, pp. 329-344.
- Mandujano C., S. Elizalde, G. Cassiano, D. Soto, D. Tenorio y M. Jiménez-Reyes
2002. "Provenance and Use Wears of Pre-Hispanic Obsidian Scrapers from Metztitlan, Hidalgo, Mexico", en *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 252, núm. 1, pp. 81-88.
- Mora, R.
1981. "Yacimientos y talleres de obsidiana en el sureste del estado de Hidalgo", en M. Gaxiola (ed.), *Yacimientos y talleres prehispánicos de obsidiana en el estado de Hidalgo*, México, INAH, pp. 21-38.
- Neivens, M., G. Harbottle y K. Kimberlin
1989. "Some Geochemical Characteristics of the Pachuca Obsidian Tegment: a Strategy for Interpreting Artifact Groups", en M. Gaxiola y J.E. Clark (eds.), *La obsidiana en Mesoamérica*, México, INAH, pp. 51-58.
- Nelson, F.W.
1989. "Resumen de los métodos analíticos usados en la identificación de yacimientos y artefactos de obsidiana", en M. Gaxiola y Clark J.E. (eds.), *La obsidiana en Mesoamérica*, México, INAH, pp. 21-26.
- Nelson, F.W. y D.M. Healan
1995. "Obsidians from the Ucareo and Zinapécuaro Áreas, Michoacan, Mexico", en *Geological Society of America: Abstract With Programs*, núm. 27.
- Potts, P. J.
1995. *A handbook of silicate rock analysis*, Londres, Blackie Academic and Professional.
- Rushing, John, John Tiller, Steve Tanner y Drew McDowell
2004. "Augmenting Wargame AI with Data Mining

Technology”, <http://www.aaai.org/Papers/Workshops/2004/WS-04-04/WS04-04-017.pdf>

- Santley, R.S., J.M. Kerley y R.R. Kneebone
1986. “Obsidian Working, Long-Distance Exchange and the Politic-Economic Organization of Early Tates”, en Isaac B. (ed.), *Economic aspects of Highland Central Mexico*, Greenwich, JAI Press (Research in Economic Anthropology, Research Annual), pp. 101-132.

- Smith, M.E., A. Burke, T.S. Hare, y M.D. Glascock
2007. “Sources of Imported Obsidian at Postclassic Sites in the Yauhtepec Valley, Morelos: a Characterization Using XRF and INAA”, en *Latin American Antiquity*, vol. 18, núm. 4, pp. 429-450.

- Spence, M.W. y J. Parsons
1967. “Prehispanic Obsidian Mines in Southern Hidalgo”, en *American Antiquity*, vol. 32, núm. 4, pp. 542-543.

- Vogt, James R., Christopher C. Graham, Robert Cobean, Michael D. Glascock, David Ives
1990. “Sources of Error in the Trace Element Characterization of Lithic Materials”, en M.D. Soto (ed.), *Nuevos enfoques en el estudio de la lítica*, México, IIA-UNAM, pp. 135-152.

