

Estudio experimental de las temperaturas en la producción de cal artesanal en Uayma, Yucatán

Experimental study of temperatures in the traditional lime production at Uayma, Yucatán

Soledad Ortiz Ruiz^{1*}, Oscar G. de Lucio², Kenneth E. Seligson³, Thania Estefanía Narváez⁴, Avto Goguitchaichvili⁵, Luis Barba Pingarrón⁶

¹ Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito exterior, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México.

² Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LAN-CIC), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 04510 Ciudad de México, México.

³ California State University-Dominguez Hills, 1000 E. Victoria Street Carson, 90747 CA, EUA.

⁴ Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete", Instituto Nacional de Antropología e Historia, Calzada General Anaya 187, San Diego Churubusco, Coyoacán, 04120, Ciudad de México, México.

⁵ Servicio Arqueomagnético Nacional, Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, 58190, Morelia, México.

⁶ Laboratorio de Prospección Arqueológica, Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito exterior, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México.

* Autor para correspondencia: (S. Ortiz Ruiz)
s.ortiz.ruiz@ia.unam.mx

Cómo citar este artículo:

Ortiz Ruiz, S., de Lucio, O.G., Seligson, K.E., Ibarra Narváez, T.E., Goguitchaichvili, A., Barba Pingarrón, L., 2024, Estudio experimental de las temperaturas en la producción de cal artesanal en Uayma, Yucatán: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 76 (2), A250324. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2024v76n2a250324>

Manuscrito recibido: 19 de Septiembre de 2023.
Manuscrito corregido: 10 de Marzo de 2024.
Manuscrito aceptado: 20 de Marzo de 2024.

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

La cal es un material versátil que ha sido utilizado por las sociedades mayas en múltiples aspectos de su vida diaria, se utilizaba en la nixtamalización y la cocina, la preparación de cerámica, en la superficie de los códices, la preparación de pigmentos, como soporte para murales y sobre todo como material constructivo en la edificación de las ciudades y poblados. ¿Cómo fue fabricada la cal? Sigue siendo un punto de discusión, ¿fue una actividad económica especializada que permitió su intercambio entre comunidades?, ¿su producción fue en piras y hornos dependiendo de su ubicación?, ¿el uso de piras estuvo ligado exclusivamente a los contextos domésticos de baja producción? Estas son algunas preguntas que siguen esperando respuesta en la investigación sobre la cal en las comunidades del área Maya. Para tratar de obtener algunas respuestas a estas cuestiones, se presenta el caso del registro de la quema de una calera realizada en el año 2022, en la comunidad de Uayma, Yucatán, México. La caracterización de las muestras provenientes de la calera ha permitido inferir detalles mineralógicos y distinguir las cenizas presentes. El registro del funcionamiento de la calera, de los materiales generados y el análisis de las muestras mediante espectroscopías moleculares, permite inferir las temperaturas que se alcanzaron en la producción artesanal de cal.

Palabras clave: Arqueología experimental, calera, producción de cal, área Maya, arqueometría, FTIR-ATR.

ABSTRACT

Lime is a versatile material that has been used by Maya societies in multiple aspects of their daily life for centuries. It is used in nixtamalization and cooking, ceramic preparation, in the surface of codex, pigment preparation, to support murals and as an important building material. How was lime made? Was lime production a specialized economic activity that fostered exchange between communities? Was its production in pyres and kilns dependent on its location? Was the use of pyres exclusively linked to domestic contexts of low production? These questions are still awaiting an answer in Maya lime production research. This paper presents a case study of experimental lime production carried out in the community of Uayma, Yucatan to try to address these questions. Characterization of the samples from the lime kiln has made it possible to infer mineralogical details and distinguish the ashes present. The recording of the operation of the lime kiln, the materials generated, and the analysis of the samples by molecular spectroscopies allow us to provide insights on the temperatures that were reached in the artisanal production of lime.

Keywords: experimental archaeology, open pyres, lime production, Maya area, archaeometry, FTIR-ATR.

1. Introducción

El estudio pirotécnico de la sociedad Maya prehispánica fue influenciado en un principio por los aspectos rituales del *performance* del fuego (Novelo Pérez, 2016), aspectos de su caracterización, uso y presencia en contextos arqueológicos llevó a la investigación antracológica (Dussol *et al.*, 2017), el aspecto culinario y la preparación de comida, el quemado de la cerámica ha sido reportado en estudios etnoarqueológicos por Arnold (2015). En el caso de la cal se han realizado investigaciones sobre su producción (Fauvet-Berthelot, 1986; Russell y Dahlin 2007; Schreiner, 2002; Wernecke, 2005, 2008), investigaciones enfocadas en los hornos de cal se hicieron presentes en la última década (Ortiz Ruiz, 2014, 2019; Ortiz Ruiz *et al.*, 2023, 2021; Goguitchaichvili *et al.*, 2020; Seligson *et al.*, 2017a, 2017b, 2019).

Estudios previos sobre las estructuras de combustión utilizadas en la producción de cal se enfocaron en el llamado método tradicional (May y Gallareta, 2003; Morris *et al.*, 1931; Russell y Dahlin, 2007; Schreiner, 2002) con escasas menciones sobre hornos (Fauvet-Berthelot, 1986; Ortiz Ruiz *et al.*, 2023; Seligson *et al.*, 2017a, 2017b, 2019). El llamado método tradicional o en piras, como la forma en la que se producía cal, está basado en el registro etnográfico. Los primeros registros los realiza Morris *et al.* (1931) en Chichen Itzá y describe lo siguiente: *“El método yucateco para producir cal en la actualidad es una herencia ancestral que ha llegado a través de los siglos, prácticamente sin cambios, salvo la sustitución de la piedra por acero en las herramientas. Ningún tipo de horno se usa, tal vez porque la única piedra disponible es de piedra caliza, por lo cual las paredes de un horno podrían ser destruidas por el fuego. Tampoco hay tierra adecuada para la construcción de paredes de barro, ni los bancos de arcilla son lo suficientemente profundos para permitir la excavación de hornos en ellos. El calero selecciona un lugar donde hay bosque maduro en estrecha proximidad a afloramientos de la piedra de calidad adecuada. Un área ligeramente más grande que el tamaño previsto de la calera para ser erigida se aclara a fondo de la vegetación y se nivela. En el centro, un poste recto, a unos*

2,75 metros de altura y 13 a 20 cm de diámetro, se pone en posición vertical. Sobre el círculo del diámetro deseado de la calera proyectada es acomodada la madera sobre el suelo”.

A partir del trabajo de Morris *et al.* (1931), la descripción de la producción de cal hace referencia al método de caleras o también llamado tradicional, tal es el caso de Chan Kom donde Redfield y Villa Rojas (1962) registran que la quema de la cal se hace fuera del pueblo donde la madera utilizada como combustible está disponible y el horno es construido y después la cal es transportada a la villa.

La investigación más extensiva sobre las piras como método de obtención de cal en el área Maya fue realizada por Schreiner (2002), quien identifica mediante etnografía, etnohistoria y empleando la arqueología experimental, seis tipos de caleras que se utilizan en tiempos modernos y que pudieron ser empleados en la época prehispánica. Su estudio tuvo como hipótesis central evaluar la propuesta de que los altos niveles de consumo de cal para la arquitectura en el periodo Preclásico Tardío (350 a.C.-150 d.C.), en el valle del Mirador, Guatemala requirió una distribución de combustible para la quema de cal que no pudo ser sostenida por los recursos disponibles alrededor del valle. Schreiner postula que el consumo de combustible estuvo relacionado al proceso de deforestación y degradación medioambiental que pudo haber contribuido al colapso de la civilización y virtual abandono del área alrededor del 150 d. C.; sin embargo, otros investigadores como Wernecke (2008), Seligson (2022), Seligson *et al.* (2017a) y Barba (2013) consideran que el manejo de la selva y los recursos naturales fue primordial al momento de producir cal sin deforestar la selva. En este estudio, la tala de madera fue realizada como parte del proceso de limpieza y adecuación de la parcela para establecer cultivos, la construcción nos demostró el uso de todo el árbol, desde las ramas más delgadas a los troncos, por lo que el manejo de los recursos naturales va hacia la sustentabilidad más que a la deforestación. Al igual que los trabajos previos, Schreiner (2002), describe la construcción de la calera en las áreas donde se ubican la materia

prima tanto la piedra como el combustible y registra que en algunos casos la cal se deja apagar a la intemperie antes de trasladarla al poblado.

Las investigaciones experimentales han sido un medio para entender la producción de cal, Schreiner (2002) realizó quemas experimentales de caleras con diversas formas, May y Gallareta (2003) replicaron con el apoyo de jornaleros de la comunidad de Oxkutzkab, una calera con la finalidad de obtener cal para la restauración de las estructuras excavadas por el proyecto arqueológico Labná, reutilizando los cantos burdos recuperados durante la excavación así como los árboles talados en la limpieza de las estructuras.

2. Arqueología experimental y la producción de cal

La arqueología experimental ha estado presente desde hace décadas en la investigación arqueológica en algunos casos muy ligada a la

etnoarqueología. Mathieu (2002) encapsula su significado al definirla como un subcampo de la investigación arqueológica que emplea diferentes métodos, técnicas, análisis y aproximaciones dentro del contexto de un experimento controlado e imitativo para replicar fenómenos pasados (desde objetos hasta sistemas) con la finalidad de generar y probar hipótesis para proveer o mejorar analogías para las interpretaciones arqueológicas.

La principal diferencia con otras subdisciplinas de la arqueología es la intención de replicar procedimientos mediante experimentos controlados; en el caso de la producción de cal, los experimentos y quemas se han realizado desde un enfoque etnoarqueológico más que experimental. La réplica de la producción se basa en el conocimiento de los informantes, más que en la necesidad del estudio material del producto.

En el caso de Uayma (Figura 1), la elaboración de la cal artesanal tuvo como finalidad obtener material para reparar el horno utilizado por los alfareros en la producción de cerámica. Esto



Figura 1 Mapa del estado de Yucatán, ubicación del municipio de Uayma, donde se realizó la calera artesanal y el sitio arqueológico de Kiuc donde se realizó el horno experimental.

permitió planear el registro de las temperaturas y la quema de la cal por medio de una pira. En nuestro caso fue posible emplear de manera simultánea la arqueología experimental y el registro etnográfico para obtener la información del registro de la alteración física de la materia prima como producto de su exposición al fuego.

Registrar el fuego y la transformación de los materiales depende de variables difíciles de estimar y monitorear, entre las que se encuentran la temperatura, el tiempo, la ignición del fuego, las alteraciones químicas, diagenética de las cenizas, los restos quemados y los subproductos del fuego, así como el material obtenido y transformado por el fuego. Cómo medimos estos detalles está ligado a cómo fue la construcción arquitectónica, mientras que la ignición del fuego nos indica la estabilidad y circulación del aire, la condición del combustible y su duración (Karkanas, 2021).

Según los parámetros identificados por Karkanas (2021), la temperatura en una pira es variable y depende de la oxigenación del fuego, la

circulación del aire y la construcción de la estructura para que permita un movimiento del fuego a través de la madera; la estabilidad de la estructura es un punto fundamental ya que, si colapsa en un momento temprano del proceso de combustión, se suprime la circulación del aire y se reduce la temperatura del fuego. En el caso de la madera utilizada no existe relación entre que sea verde o seca y la conducta térmica del fuego, lo único que se ve afectado con el uso de madera verde es el tiempo en alcanzar la temperatura máxima. En el caso de la calera artesanal, se registró un momento en el cual la calera ‘llora’ en palabras de los artesanos. Este proceso se debe a la pérdida de agua, savia y resina de la madera verde utilizada en la calera; posiblemente el uso de la madera verde y semi seca contribuye al aislamiento térmico de la calera (Figura 2).

En nuestro caso de estudio, el proceso de obtención de cal radica en la transformación de los fragmentos de roca caliza a través del fuego. El ciclo químico de la cal depende de la



Figura 2 Calera en proceso de calentamiento y calcinación, en el suelo se registra la presencia de la savia, agua y las resinas que contenía el combustible cayendo, y se observa la diferencia entre la zona más húmeda y la más seca conforme se va calentando la calera.

descomposición de los fragmentos de roca caliza formado por carbonato de calcio (CaCO_3) a través de la energía proporcionada por el fuego en óxido de calcio (CaO) el cual se hidrata posteriormente y convierte en un hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] con lo cual queda listo para ser utilizada o almacenada. Al usarse y fraguar incorporando dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera se vuelve a formar el carbonato de calcio, solo que ahora en la forma que le hayan dado los constructores. La dificultad de los estudios sobre la cal radica en que la cal obtenida mediante un proceso antropogénico es químicamente igual a la roca de la cual se obtuvo y esto ha traído dificultades para la caracterización (Barba Pingarrón, 2013; Barba Pingarrón y Cordova Frunz, 2010; Frierman, 1971; Hansen, 2000; Karkanas, 2007; Kingery *et al.*, 1988; Philokyprou, 2012; Schreiner, 2002; Villaseñor Alonso, 2010; Villaseñor Alonso y Barba Pingarrón, 2012; Wingate, 1985).

En cuanto a la materia prima, las rocas empleadas en la producción de cal son clasificadas como rocas sedimentarias, pertenecientes al grupo de los carbonatos, que pueden ser carbonatos de calcio

(CaCO_3), carbonatos de magnesio (MgCO_3) y dolomita [$\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$], materiales presentes en la península de Yucatán, donde las calizas compuestas de carbonatos de calcio (CaCO_3) con minerales de calcita, aragonita y vaterita, donde la composición química es la misma y lo que cambia es la estructura mineral siendo la trigonal calcita, la ortorrómbica aragonita y la hexagonal vaterita, la aragonita a diferencia de los otros minerales se encuentra en las conchas. La cal producida a partir de conchas se prefiere para uso culinario. En el caso de las rocas con magnesita tenemos los minerales dolomita, ankerita y magnesita. El proceso productivo de la cal nos indica que la temperatura de calcinación a la cual son expuestas las rocas calizas necesita alcanzar una temperatura entre los $750^\circ\text{C} - 850^\circ\text{C}$; sin embargo, en el caso del carbonato de magnesio (MgCO_3) las temperaturas de calcinación pueden ser más bajas entre los $400^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$ y en el caso de la aragonita pirogénica se produce a partir de los 900°C (Barba Pingarrón, 2013; Hansen, 2000; Ortiz Ruiz, 2019; Schreiner, 2002; Toffolo *et al.*, 2019).

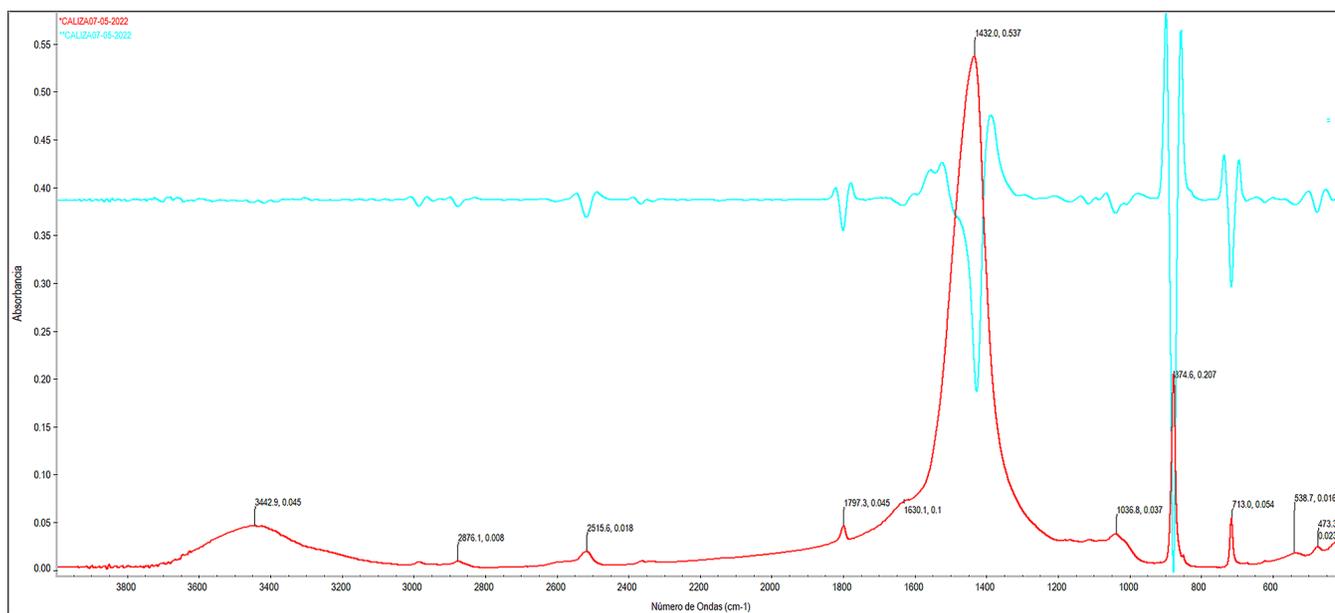


Figura 3 Identificación mineralógica por la técnica de FTIR, mostrando el espectro y la segunda derivada de los minerales encontrados en la materia prima, se identifica calcita y montmorillonita.

Tabla 1. Identificación de la mineralogía y los procesos de cambio que sufren los materiales expuestos al fuego y la denominación que los artesanos le otorgan.

Muestra	Identificación FTIR (posición cm ⁻¹)	Mineralogía	Fórmula Química	Identificación según los Artesanos
Materia Prima	3429, 1797, 1630, 1432, 1036874, 713, 538, 473	Calcita, Montmorillonita	CaCO ₃ (Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O	<i>tok tunich</i> o <i>sak tunich</i>
Residuos de quema	3696, 3642, 1795, 1410, 1394, 1118, 1060, 962, 8873, 848, 712, 621, 547, 466, 407	Calcita, Portlandita, Montmorillonita	CaCO ₃ (Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O Ca (OH) ₂	Ceniza
Piedra de cal	3643, 3424, 1797, 1424, 1115, 951, 875, 713	Calcita, Portlandita, Montmorillonita,	CaO Ca (OH) ₂ (Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O	Cal a medio cocer
Cal junio 2023	1795, 1408, 1018, 873, 848, 712	Calcita, Montmorillonita	CaCO ₃ (Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O	Cal útil

En la quema de caliza para producir cal se necesita tener en consideración la geología del territorio de extracción de la piedra. Cada forma de cal -calcita, magnesita o dolomita- tienen un uso preferencial por sus diferencias en las propiedades físicas finales. La cal dolomítica tiene propiedades cementantes más fuertes y la cal con magnesio produce un estuco más durable y compacto con grandes propiedades adhesivas (Hansen, 2000; Schreiner, 2002; Villaseñor Alonso, 2010).

En el caso de la materia prima utilizada en Uayma para la producción de cal, ésta ha sido caracterizada como roca caliza formada por calcita con presencia de bandas de SiO en 1030-1090 cm⁻¹ en vibración de tensión acompañado por una combinación de SiO, AlO en vibración de flexión en 465-470 cm⁻¹, lo que nos permite identificar la presencia de minerales de calcita y montmorillonita (Figura 3, Tabla 1).

2.1 CALERAS EN EL ÁREA MAYA

El llamado método tradicional de producción de cal en el área Maya fue ampliamente estudiado por Schreiner (2002), Wernecke (2008), Morris *et al.* (1931), Russell y Dahlin (2007). Las caleras fueron definidas como piras al aire libre construidas apilando ramas y troncos de forma circular, rectangular y cuadrangular. En la parte superior

de la pira se apilaban los fragmentos de las rocas calizas. En algunas regiones, Schreiner (2002) identificó el uso de huecos excavados a poca profundidad para hacer la calera. Las caleras más comunes fueron construidas de forma horizontal y se ha registrado al menos un tipo que apila la madera de forma vertical.

Se han identificado los siguientes tipos: pira de madera seca donde no se logra controlar la combustión, el quemado y el fuego debido a la facilidad de quema de la madera seca; pira húmeda donde se utiliza madera recién cortada que ayuda a contener el calor, el patrón de quemado y la calcinación a bajas temperaturas; y un tercer tipo que utiliza la mezcla de madera seca y húmeda en la construcción de la pira (Schreiner, 2002; Wernecke, 2005).

2.1.1. CONSTRUCCIÓN DE LA CALERA EN UAYMA

La calera fue elaborada en el terreno donde se ubica el Centro Cultural *Najil K'at* (La Casa del Barro), taller de alfarería de la familia Espadas Dzul. La construcción de la calera fue dirigida por don Pedro, artesano especialista en trabajar con el fuego. Durante las quemadas de cerámica que hemos registrado en el taller, él es uno de los artesanos que se encargan de encender el horno. Don Pedro tiene experiencia en la elaboración de cal artesanal, pues la utilizan en la construcción y



Figura 4 Proceso de construcción y quema de la calera artesanal en Uayma, Yucatán.

reparación del horno de cerámica. En su experiencia la cal artesanal soporta el fuego mejor que la cal industrial (Figura 4).

La calera midió vara y media (3 m) de diámetro y aproximadamente 2 m de altura, la construcción fue de forma circular, se utilizó madera de *chakaj* (*Bursera simaruba*), *cheechem* (*Metopium brownei*), *ja'abin* (*Piscidia piscipula*), *tzalam* (*Lysiloma latisiliquum*) y *chakte'* (*Coullteria mollis*); la estibación de los maderos fue de forma radial utilizando las ramas pequeñas de los árboles (con diámetros de 10 – 15 cm), los troncos de diámetros mayores (30 – 50 cm) se utilizaron para darle estabilidad a la calera y se colocaron de forma cruzada entre las capas de ramas menores y como puntales para sostener las paredes de la calera (Figura 4).

Cuando la calera alcanzó la altura esperada, se colocó una capa de madera de *chakaj* (*Bursera simaruba*) picada la cual aplanaba la superficie de la calera sin dejar orificios y su función era ser el piso de la calera donde se depositó la piedra caliza. La caliza fue extraída de la superficie del terreno, buscando la denominada *tok tunich* o *sak tunich*, los cantos grandes de piedra se fragmentaron con la ayuda de un mazo para obtener piezas de 5 – 10 cm de diámetro que fueron estibadas sobre la calera.

Al centro de la calera, durante la construcción, se ubicó el área de ignición y el conducto para su encendido, el área de ignición fue cubierta con corteza seca y ramas pequeñas para su encendido a través del túnel, este conducto tuvo una orientación este-oeste. Al quedar lista la calera se dejó reposar un día y su quemado inició en la tarde siguiente.

La cantidad de madera utilizada no pudo ser pesada, se cuantificó de acuerdo con los parámetros de los artesanos, quienes mencionaron que la construcción llevó un aproximado de una camioneta de leña, lo que equivale aproximadamente a una tonelada. Asimismo, la piedra fragmentada y lista para quemar, fue contabilizada a través de cubetas de 20 litros, llevando la calera 19 cubetas. Los artesanos mencionan que la calera es pequeña, pues la cal que necesitan es solo para la reparación del horno de cerámica.

La materia prima utilizada tanto en la forma de combustible y piedra fueron extraídas y taladas del terreno donde se ubica el Centro Cultural *Najil K'at*, y proviene de la limpieza de las áreas que fueron utilizadas para la construcción de vivienda y para la ubicación de la huerta de verduras y árboles frutales. La ubicación de la calera fue en el lado este del terreno justo detrás de la cocina y la construcción tuvo una orientación ligeramente hacia el noreste, aspecto que se encuentra relacionado con la dirección del viento (Figura 5).

Los artesanos llevaron a cabo rituales en la calera, que no se nos permitieron registrar, pero que concuerdan según los relatos con lo descrito por Russell y Dahlin (2007). Después de esto el encendido de la calera se realizó aproximadamente a las 6 de la tarde, cuando el calor de mayo había disminuido, la quema de la calera siguió durante toda la noche y al menos durante los 3 días siguientes.

3. Métodos de registro y análisis

El registro de la calera se llevó a cabo con la intención de obtener cal para realizar probetas de análisis, registrar el proceso de apagado tradicional y conocer cómo se produce la cal artesanal en una comunidad Maya actual. El trabajo de registro incluyó la recolección de piedras calizas antes de calcinar, se colocaron termopares y se fotografió el proceso de construcción y quema de la calera.

3.1. REGISTRO DE TEMPERATURAS DURANTE LA QUEMA

Antes de iniciar la quema de la calera se colocaron 3 termopares tipo K, controlados mediante un *data logger Sper Scientific* 800025 localizados al interior del túnel, en la parte media de la calera y sobre las piedras que se calcinarían para la obtención de la cal. Los termopares registraron desde la temperatura ambiente a los 1012°C durante la quema. En el momento álgido de la quema cuando truena y colapsa la pira las temperaturas registradas fueron arriba de los 1600°C, lo cual indicó un error en el

registro, puesto que los termopares tipo K alcanzan temperaturas máximas de 1200°C. Se utilizó también una pistola de IR para registrar las temperaturas modelo *Dual Laser Video IR Thermometer de EXTECH Instruments* tipo K que tiene un rango de -50 a 2200°C la cual nos proporcionó temperaturas máximas de 1300°C. Cuando se retiraron los termopares fue posible observar que el alambre aun recubierto con la cerámica se fracturó lo cual provocó lecturas posiblemente erróneas en el momento del colapso (Figura 6).

3.2. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

La construcción de la calera permitió recolectar fragmentos de piedra caliza antes de ser quemado y se colectaron muestras a los 3 días de la quema cuando la temperatura de la cal era

de 300°C, en diferentes secciones de la calera, se colectaron algunas muestras de los bordes de la calera donde se ubicaron las piedras a medio calcinar. A las 2 semanas de la quema cuando la calera tenía una temperatura de 50°C y ya no era visible la llama interior al centro de la calera se colectaron muestras en el centro y laterales tanto del polvo como de las piedras de cal, las muestras no fueron apagadas con agua, sino que se dejaron al ambiente. Después, a los 3 meses cuando ya habían caído las primeras lluvias de la temporada se colectaron muestras de la cal ya apagada por la lluvia. En la primavera se colectó otro conjunto de muestras de la misma área para identificar todo el proceso de apagado y recarbonatación que sufrió la cal a 9 meses de ser quemada. Por último, las muestras fueron colectadas después del año

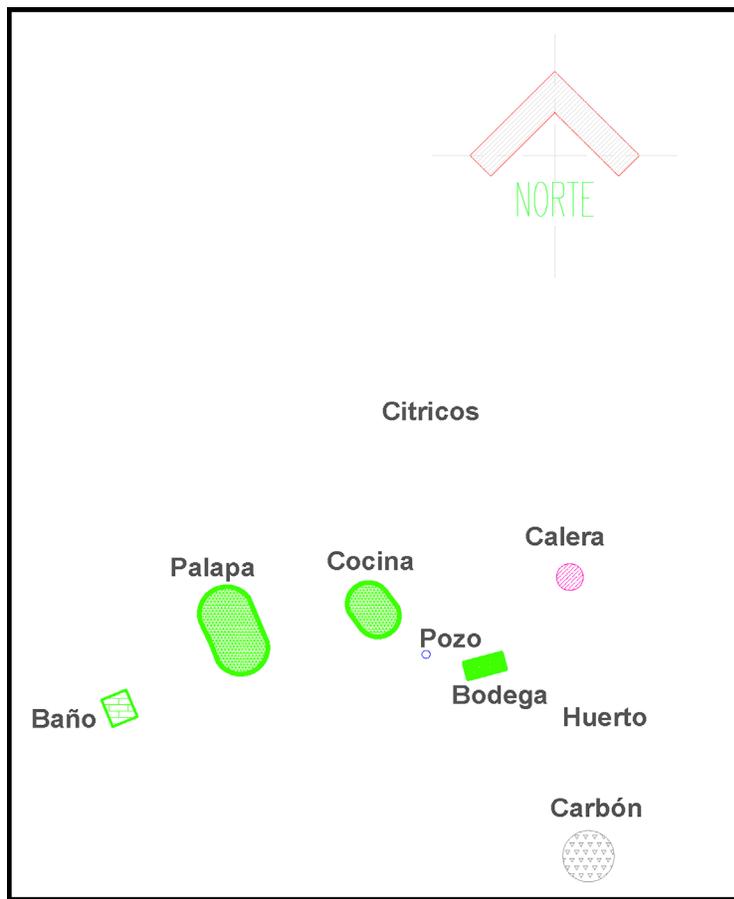


Figura 5 Croquis de ubicación de la calera con respecto a las construcciones habitacionales y de servicio en el predio de Najil K'at.

de exposición al ambiente y las lluvias cuando la cal iba a ser utilizada en la restauración del horno de cerámica.

3.3. ANÁLISIS DE ESPECTROMETRÍA DE INFRARROJO

La espectrometría de infrarrojo (FTIR) es una técnica que permite identificar los materiales a partir de las señales de vibración de los enlaces moleculares de los materiales y proporciona información sobre el tipo de polimorfo de los minerales y su orden atómico (Gueta *et al.*, 2007). La técnica se utilizó para realizar la caracterización mineral e

identificar los cambios en los materiales debido a su exposición al fuego, así como el proceso de apagado y recarbonatación en el ambiente húmedo y durante las temporadas de lluvia y secas de Yucatán, siguiendo la propuesta de Toffolo *et al.* (2017, 2019), Regev *et al.* (2010), Ortiz Ruiz *et al.* (2023).

Para identificar los cambios estructurales y las temperaturas remanentes en los materiales, los resultados obtenidos se contrastaron con los datos y muestras previamente estudiadas por Ortiz Ruiz *et al.* (2023) y con muestras experimentales provenientes de un horno de cal proporcionadas analizadas por Seligson *et al.* (2017b).

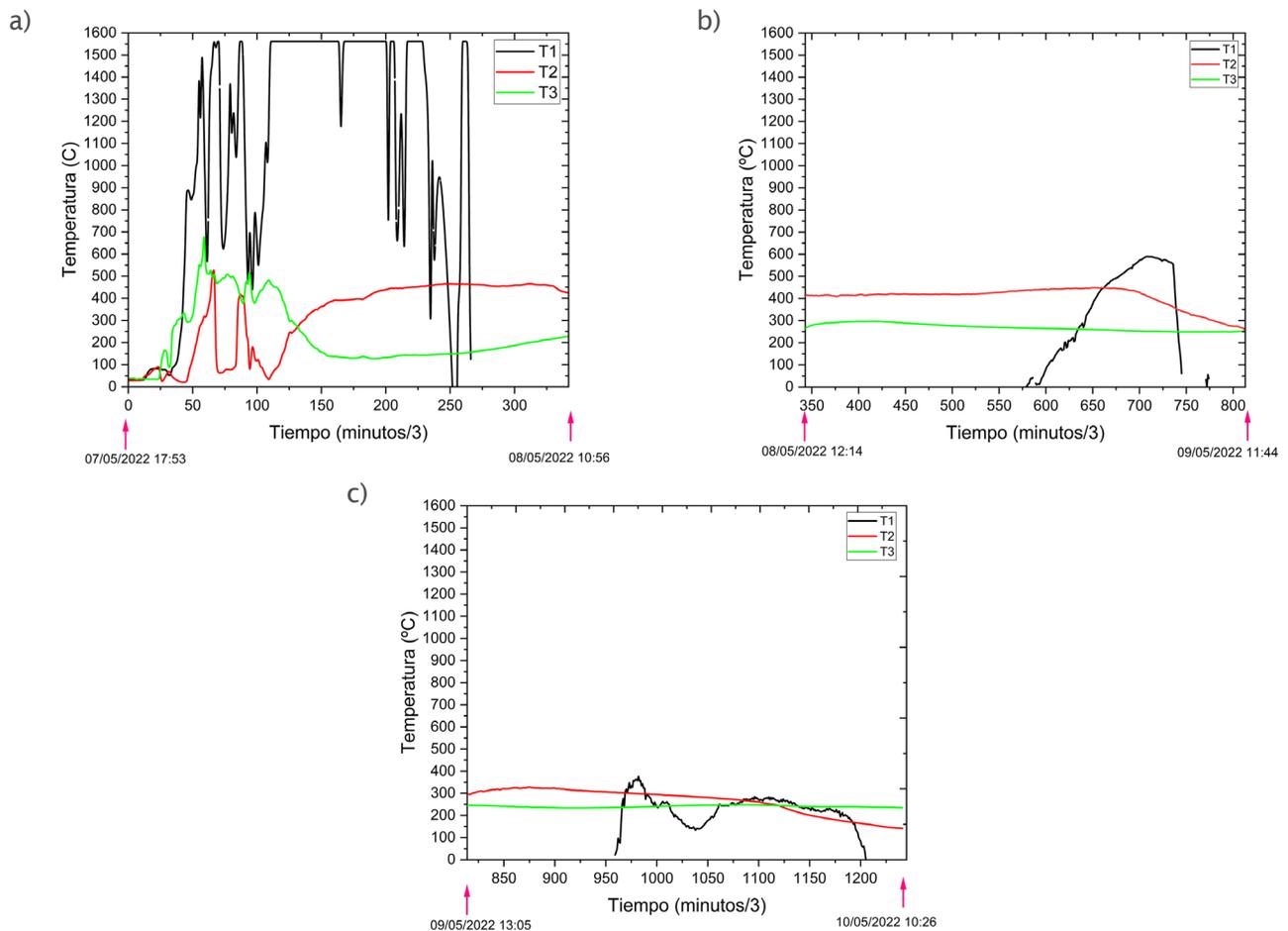


Figura 6 Registro de las temperaturas durante la quema de la calera: a) gráfica que indica el periodo entre el 07/05/2022 17:53 pm al 08/05/2022 10:56 am. b) periodo de registro entre el 08/05/2022 12:14 pm al 09/05/2022 11:44 am y c) periodo entre el 09/05/2022 13:05 pm al 10/05/2022 10:26 am.

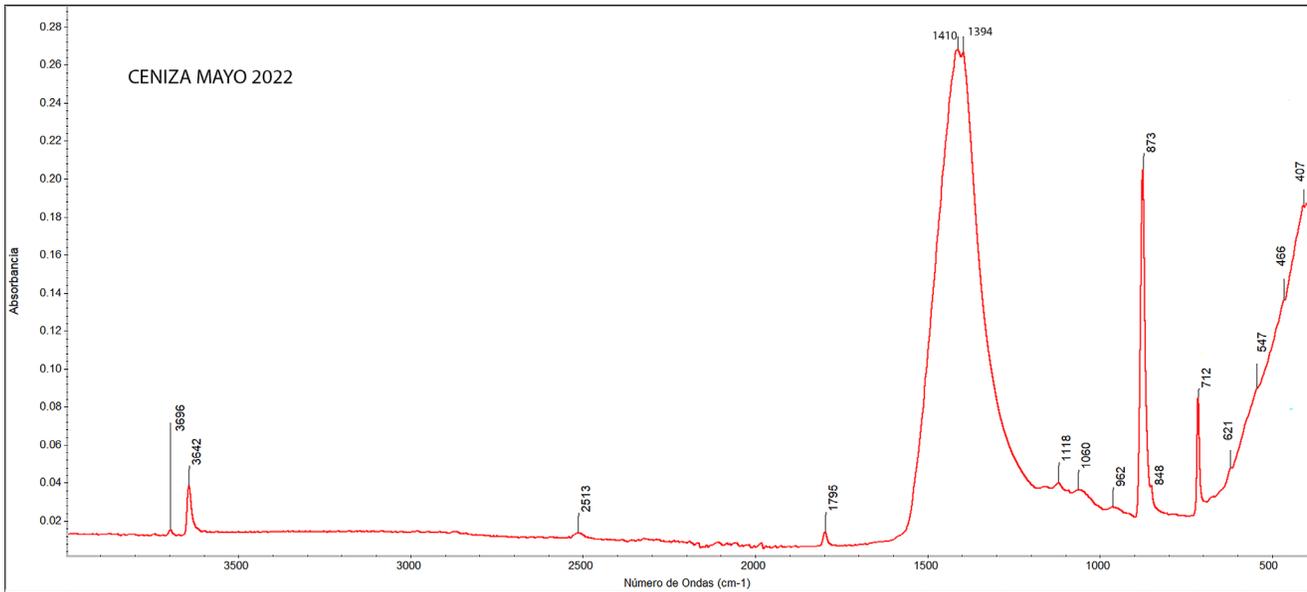


Figura 7 Espectro de infrarrojo (FTIR-ATR) de la muestra identificada como ceniza en el campo, donde se observa la presencia de portlandita en la banda 3642 cm^{-1} y las bandas 1118 , 1060 y 962 cm^{-1} que corresponden a las bandas de silicio-oxígeno (Si-O) mezcladas con las bandas ν_2 (873 cm^{-1}), ν_3 (1410 cm^{-1}) y ν_4 (712 cm^{-1}) del carbonato de calcio (CaCO_3).

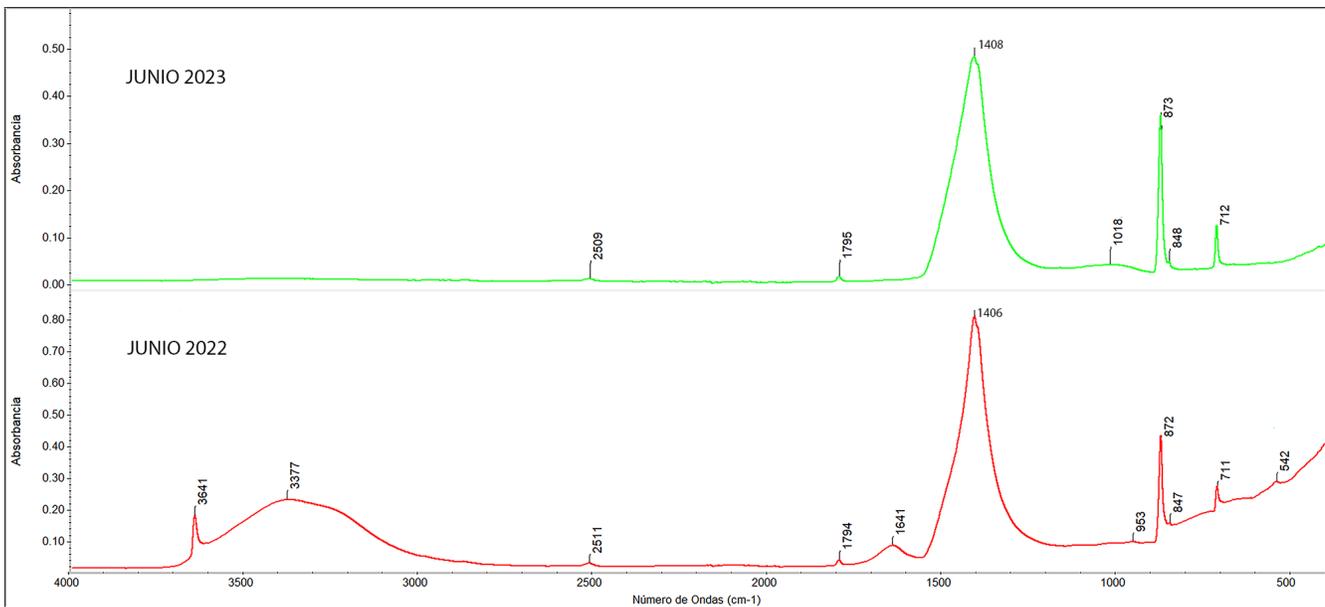


Figura 8 Comparación de los espectros FTIR-ATR de la cal recolectada en junio de 2022 después de las primeras lluvias de la temporada y la cal recolectada en junio de 2023. Se observa en la muestra de junio 22 la presencia de portlandita en la banda 3641 cm^{-1} y agua en la banda 3377 cm^{-1} un año después la muestra está estable no se registra la portlandita.

Los análisis fueron realizados con el módulo de Reflectancia Total Atenuada (ATR) y por transmisión, la preparación de las muestras incluyó el molido de la muestra, en un mortero y pistilo de ágata y el polvo así obtenido fue depositado en un recipiente, en espera de su análisis. La muestra pulverizada procedió a ser analizada utilizando un espectrómetro portátil Bruker Alpha Platinum en modo ATR con cristal de diamante y en modo transmisión los espectros fueron adquiridos a una resolución de 4 cm⁻¹ y 32 scans en el intervalo de 400-4000 cm⁻¹ en números de onda.

La identificación mineralógica de las muestras analizadas se realizó mediante la comparación de los espectros con los materiales de referencia certificados del National Institute of Standards and Technology, SMR88b y SMR1D y las bases de datos publicadas por Chukanov (2014) y el repositorio de espectros *FTIR del Kimmel Center for Archaeological Science Infrared Standard Library del Weizmann Institute of Science*.

4. Resultados

La caracterización de las muestras analizadas pertenecientes a la calera después de la quema indica la presencia únicamente de calcita. Las muestras identificadas durante la colecta en campo como ceniza mostraron una composición mineralógica de carbonato de calcio; portlandita; y una presencia de bandas en la región de 1000-1200 cm⁻¹ que posiblemente corresponden a los oxalatos o sulfatos de calcio mezclados con silicio (Figura 7), típicamente asociadas a la composición de la madera (Feriancová *et al.*, 2020).

En el caso de la cal hidratada, la presencia de portlandita y silicio es menor que en el caso de las muestras identificadas como ceniza. La recarbonatación se estabilizó después de un año de exposición a las lluvias y el ambiente, la presencia de portlandita y el silicio es mínimo en los espectros más recientes (Figura 8, Tabla 1).

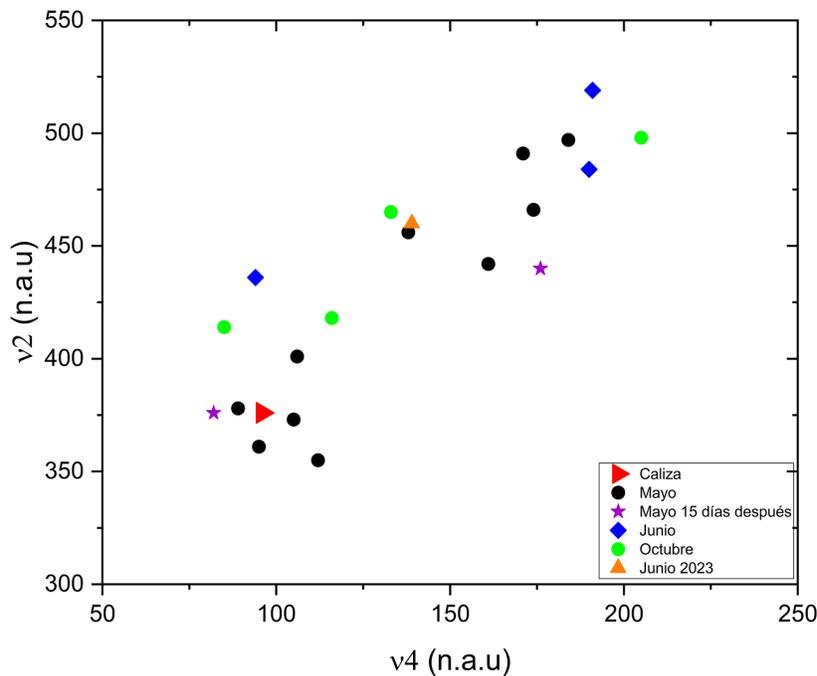


Figura 9 Gráfica de las intensidades de las bandas ν₂ vs. ν₄ de las muestras recolectadas en la calera, la muestra identificada como caliza corresponde a la geológica antes de la quema.

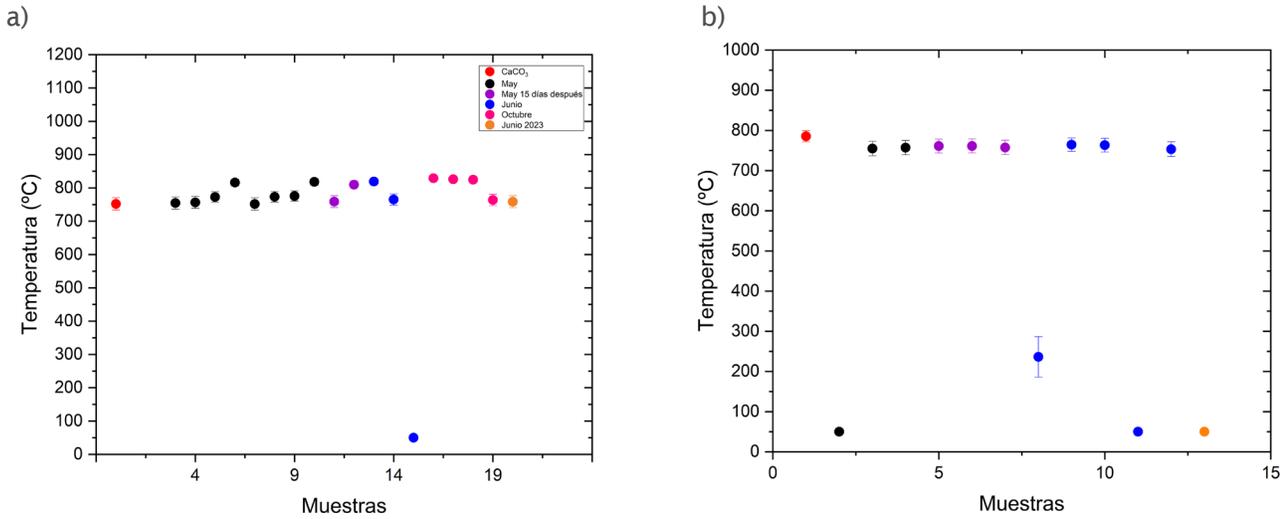


Figura 10 Comparación de las temperaturas de las muestras de la calera y el horno experimental de *Kiuic* siguiendo la metodología de Ortiz Ruiz *et al.* (2023).

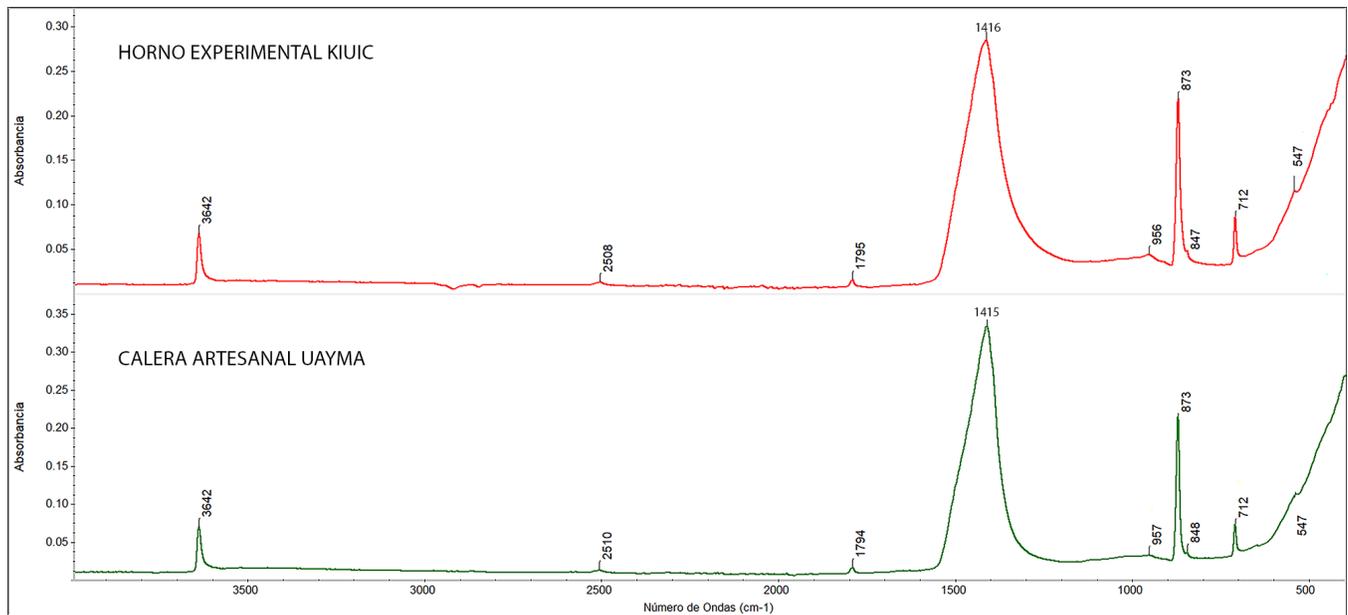


Figura 11 Comparación de los espectros FTIR-ATR de las muestras de cal de la calera de Uayma y del horno experimental de *Kiuic* antes de su recarbonatación, ambos sistemas de producción dan como resultado muestras con las mismas bandas, variando en temperatura únicamente.

El registro de las temperaturas la realizamos desde el momento de la quema hasta 3 días después, cuando se alcanzó una temperatura estable alrededor de los 250°C. A los 15 días de la quema registramos alrededor de 100°C y un mes después de la quema en el momento de las primeras lluvias registramos 50°C. Para octubre la calera se encontró completamente apagada al final de la temporada de lluvias y huracanes. Este registro de temperatura al momento de la quema marca la temperatura máxima sobre las rocas quemándose de 1012°C¹(Figura 6).

El registro de las temperaturas la realizamos desde el momento de la quema hasta 3 días después, cuando se alcanzó una temperatura estable alrededor de los 250°C. A los 15 días de la quema registramos alrededor de 100°C y un mes después de la quema en el momento de las primeras lluvias registramos 50°C. Para octubre la calera se encontró completamente apagada al final de la temporada de lluvias y huracanes. Este registro de temperatura al momento de la quema marca la temperatura máxima sobre las rocas quemándose de 1012°C¹(Figura 6).

Los resultados del cálculo de la temperatura siguiendo la metodología de Ortiz Ruiz *et al.* (2023) y Regev *et al.* (2010) permiten identificar los cambios estructurales que sufrió la calcita después de la quema; los resultados nos indican que la temperatura máxima que registran es 829°C. La relación entre v_2 y v_4 marca también el cambio entre la caliza y el carbonato de calcio estable de un año después de la calcinación (Figura 9). Asimismo, registramos el comportamiento a lo largo del periodo de calcinación y estabilización de las muestras que nos permite tener estos datos como referencia en los procesos de carbonatación de las muestras. Las muestras de la calera las comparamos con las muestras del horno experimental que realizó Seligson *et al.* (2017a) y fue interesante registrar que la cal y las muestras de diferentes zonas del horno alcanzaron entre 785°C a 753°C, una muestra

presentó una temperatura baja de 236°C y hubo muestras sin evidencia de ser expuestas al fuego, asignándoles una temperatura de 50°C (Figura 10 y 11).

Es interesante notar que el intervalo de temperaturas registradas en las muestras de la calera se ubica en entre los 754°C a los 829°C, que corresponde a 183°C menos que el máximo de la temperatura registrada antes del colapso del termopar, en el caso del horno experimental Seligson *et al.* (2017a) registra una temperatura máxima de 937.4°C, las muestras analizadas se ubican en el intervalo entre los 785°C – 750°C con una diferencia de 152.4°C con respecto a la temperatura registrada durante la quema.

El registro de la calera construida en Uayma, Yucatán brindó la oportunidad de generar un conjunto de muestras de referencia de cal, caliza y ceniza, así como de materiales utilizados para la producción y residuos de la producción. Las temperaturas máximas registradas durante el fuego tienen una duración entre 3 – 10 minutos; las temperaturas medias se registraron aproximadamente durante 2 horas y las temperaturas bajas se registraron durante 48 horas.

5. Discusión y consideraciones finales

Con esta muestra de la producción artesanal de la cal en Uayma se dio la oportunidad de obtener materiales artesanales que proporcionan una referencia para el contexto productivo tanto de las materias primas como los productos obtenidos, y los cambios que sufre el material al ser expuesto al ambiente. La cal y su proceso de carbonatación duró un año completo, siendo la muestra estable la tomada en junio de 2023.

Estos materiales de referencia permiten observar el proceso artesanal de producción de cal desde la pirotecnología y comparar los materiales de experimentos previos (Ortiz Ruiz *et al.*, 2023; Seligson *et al.*, 2017b) que nos indican que el uso de la pira u horno no se relaciona al control del fuego. Las temperaturas

¹ El termopar (T1) que medía la temperatura se rompió durante el colapso de la pira.

remanentes en los materiales y las registradas con los termopares indican un conocimiento del fuego para alcanzar su propósito de producir cal.

El uso de un horno o pira podría estar más relacionado con la cantidad y el uso de la cal; los hornos se han localizado en contextos domésticos, y la desventaja para el estudio de una pira es su efímera duración en el contexto arqueológico. En algunos hornos se ha registrado la presencia de cal en su interior como contexto sellado, esto nos puede sugerir que la cal calcinada en hornos se dejaba apagar en el interior de la estructura dando oportunidad a un apagado lento, expuesto al ambiente. Posiblemente, como sugiere Russell y Dahlin (2007) la producción de cal fue realizada temporalmente y por estaciones, aspecto reafirmado por los artesanos quienes nos indicaron que el mejor momento para producir cal es a finales de la temporada de secas, justo antes de las lluvias; los alfareros igualmente nos indicaron que el uso de la cal se da después de un año de la quema, cuando ellos afirman que está lista, posiblemente debido a que ha sufrido procesos de hidratado tanto por la lluvia como por el ambiente con alta humedad relativa, sin embargo necesitamos llevar a cabo análisis complementarios para entender el proceso completo de cambios estructurales y mecánicos que sufre la cal expuesta al ambiente.

La cal se mantiene en el lugar donde fue quemada y únicamente se retira la cantidad que se necesita ya sea para la construcción o la reparación en este caso de los hornos de cerámica; probablemente fue el mismo caso en los hornos prehispánicos donde hemos registrado la presencia de cal en su interior. Los registros de la temperatura nos indican que el proceso de producción es dinámico, las temperaturas máximas duran minutos, pero los cambios estructurales en los materiales reflejan los procesos de combustión donde el fuego varió y donde la ubicación del material refleja no solo la temperatura máxima, sino su exposición directa al fuego.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Ortiz Ruiz, S., de Lucio, O.G., Barba Pingarrón, L.; Análisis o adquisición de datos: de Lucio, O.G., Ortiz Ruiz, S., Ibarra Narváez, T.E.; Desarrollo metodológico/técnico: de Lucio, O.G., Ortiz Ruiz, S., Barba Pingarrón, L.; Redacción del manuscrito original: Ortiz Ruiz, S., Redacción del manuscrito corregido y editado: Ortiz Ruiz, S., de Lucio, O.G., Ibarra Narváez, T.E., Barba Pingarrón, L., Goguitchaichvili, A., Seligson, K.E.; Diseño gráfico: Ortiz Ruiz, S., de Lucio, O.G.; Trabajo de campo: de Lucio, O.G., Ortiz Ruiz, S., Seligson, K.E.; Interpretación: de Lucio, O.G., Ortiz Ruiz, S., Seligson, K.E.; Financiamiento: de Lucio, O.G., Ortiz Ruiz, S., Barba Pingarrón, L., Goguitchaichvili, A., Seligson, K.E.; Dirección de proyecto: Ortiz Ruiz, S., Barba Pingarrón, L., de Lucio, O.G., Goguitchaichvili, A.

Financiamiento

El trabajo de campo e investigación fue financiado por el proyecto CONAHCYT CF 2019 No. 731762; el trabajo de laboratorio fue posible gracias a los proyectos CONAHCYT LN293904, LN 299076, LN314846, LN315853 y parcialmente apoyado por el proyecto UNAM-PAPIIT IN100224.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC-IF), el uso de las instalaciones. Al físico Alan Nagaya por su apoyo en la adquisición de datos en el laboratorio. Goguitchaichvili, A., agradece apoyo parcial del proyecto UNAM-PAPIIT IN100224.

Se agradece a los artesanos Virgilio Espadas, Emilio Espadas y Pedro Espadas su disposición

para permitir llevar a cabo esta investigación y a todos los artesanos que nos apoyaron durante nuestra estancia en *Najil Kat*. S. Ortiz agradece al CONAHCyT el apoyo recibido durante la Estancia Posdoctoral.

Conflicto de intereses

Los autores hacen constar que no existen conflictos de interés con otros autores, instituciones u otros terceros sobre el contenido (total o parcial) del artículo.

Editor a cargo

José Luis Ruvalcaba Sil.

Referencias

- Arnold, D.E., 2015, The evolution of ceramic production organization in a Maya community: Boulder, University Press of Colorado, 352 p. <https://doi.org/10.5876/9781607323143>
- Barba-Pingarrón, L.A., 2013, El uso de la cal en el mundo prehispánico mesoamericano, en Barba Pingarron, L.A., Villaseñor Alonso, I. (eds.), *La Cal: Historia, propiedades y usos*: Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas, 19-46.
- Barba-Pingarrón, L.A., Córdova-Frunz, J.L., 2010, *Materiales y energía en la arquitectura de Teotihuacán*: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas, 223 p.
- Chukanov, N.V., 2014, *Infrared Spectra of Mineral Species. Extended library*: New York, Springer, 1726 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7128-4>
- Dussol, L., Eliot, M., Théry-Parisot, I., 2017, *Experimental anthracology: Evaluating the role of combustion processes in representativity of archaeological charcoal records in tropical forest, a case of study from the Maya Lowlands*: *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12, 480-490. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.02.020>
- Fauvet-Berthelot, M.F., 1986, *Ethno-préhistoire de la Maison Maya (Guatemala 1250-1525)*: Guatemala, Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos (CEMCA), 300 p. <https://doi.org/10.4000/books.cemca.3634>
- Feriancová, A., Pajtásová, M., Moricová, K., Pecusová, B., 2020, Using of wood ash as the alternative filler for preparation of rubber mixtures in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 776, 012087. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/776/1/012087>
- Frierman, J.D., 1971, Lime burning as the precursor of fired ceramics: *Israel Exploration Journal*, 21(4), 212-216. <https://www.jstor.org/stable/27925291>
- Goguitchaichvili, A., Ortiz-Ruiz, S., Morales, J., Kravchinsky, V.A., de Lucio, O., Cejudo, R., Garcia, R., Uc González, E., Ruvalcaba, J.L., Barba-Pingarrón, L., 2020, Pyrotechnological knowledge in the pre-Hispanic Maya society: Magnetic and infrared spectrometry surveys of limekilns in the western Yucatan Peninsula (Mexico): *Journal of Archaeological Science: Reports*, 33, 102457. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102457>
- Gueta, R., Natan, A., Addadi, L., Weiner, S., Refson, K., Kronik, L., 2007, Local atomic order and infrared spectra of biogenic calcite: *Angewandte Chemie International Edition*, 46(2), 291-294. <https://doi.org/10.1002/anie.200603327>
- Hansen, E.F., 2000, *Ancient maya burnt-lime technology: cultural implications of technological Styles*: Los Ángeles, University of California, tesis doctoral, 870 p.

- Karkanas, P., 2007, Identification of lime plaster in prehistory using petrographic methods: A review and reconsideration of the data on the basis of experimental and case studies: *Geoarchaeology: An International Journal*, 22(7), 775-796. <https://doi.org/10.1002/gea.20186>
- Karkanas, P., 2021, All about wood ash: long term fire experiments reveal unknown aspects of formation and preservation of ash with critical implications on the emergence and use of fire in the past: *Journal of Archaeological Science*, 135, 105476. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105476>
- Kingery, D.W., Vandiver, P.B., Prickett, M., 1988, The beginning of pyrotechnology, part II. Production and use of lime and gypsum plaster in the pre-pottery Neolithic Near East: *Journal of Field Archaeology*, 15(2), 219-243. <https://doi.org/10.1179/009346988791974501>
- Mathieu, J.R., 2002, Introduction-Experimental Archaeology: Replicating past objects, behaviors, and processes, in Mathieu, J.R., (ed.), *Experimental Archaeology. Replicating past objects, behaviors, and processes*: Oxford, BAR International Series 1035, 165 p. <https://doi.org/10.30861/9781841714158>
- May-Ciau, R., Gallareta-Negrón, T. 2003, La Calera. Investigaciones Arqueológicas y Restauración Arquitectónica en Labná, Yucatán, México: La Temporada de campo 2002: Yucatán, México, Centro INAH, informe técnico, 203 p.
- Morris, E.H., Charlot, J., Morris, A.A., 1931, The temple of the Warriors at Chichén Itzá Yucatán. Volume I: Washington D.C., Carnegie Institution of Washington, 485 p.
- Novelo Pérez, M.J., 2016, El fuego en la vida cotidiana de los grupos domésticos en el Área Maya: Mérida, México, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ciencias Antropológicas, tesis de maestría, 200 p.
- Ortiz Ruiz, M.S., 2014, Caracterización de las estructuras anulares de la región Occidente de las Tierras Bajas Mayas: Michoacán, México, El Colegio de Michoacán, A.C., 139 p.
- Ortiz Ruiz, M.S., 2019, El Conocimiento pirotécnológico de la sociedad Maya prehispánica: Estudio de los hornos para cal en las Tierras Bajas Mayas del Norte: Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de doctorado, 212 p.
- Ortiz Ruiz, S., Goguitchaichvili, A., Kravchinsky, V.A., Cejudo, R., de Lucio, O., Bautista, F., Villa, A., Góngora, A., Morales, J., Barba-Pingarrón, L., 2021, Maya Limekilns as geomagnetic Field recorders: *Journal of South American Earth Sciences*, 109, 103284. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103284>
- Ortiz Ruiz S., de Lucio, O.G., Mitrani-Viggiano, A., Pérez-Castellanos, N.A., Ruvalcaba Sil, J.L., Barba-Pingarrón, L., Goguitchaichvili, A., 2023, Mayan Fire: Calibration curve for determination of heating temperatures of limestone, lime, and related materials by FTIR measurements: *Journal of Archaeological Science: Reports*, 49, 103966. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.103966>
- Philokyprou, M., 2012, The Beginnings of Pyrotechnology in Cyprus: *International Journal of Architectural Heritage*, 6(2), 172-199. <https://doi.org/10.1080/15583058.2010.528145>
- Redfield, R., Villa Rojas, A., 1962, Chan Kom: A Maya Village: Chicago, University of Chicago Press, 420 p.
- Regev, L., Poduska, K.M., Addadi, L., Weiner, S., Boaretto, E., 2010, Distinguishing between calcites formed by different mechanisms using infrared Spectrometry: *Archaeological Applications: Journal of Archaeological Science*, 37, 3022-3029. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.027>
- Russell, B.W., Dahlin, B.H., 2007, Traditional burnt-lime production at Mayapán: *Journal of Field Archaeology*, 32(4), 407-423. <https://doi.org/10.1179/009346907791071494>
- Schreiner, T.P., 2002, Traditional Maya lime

production: Environmental and cultural implications of a native American technology: Berkeley, University of California, Department of architecture, tesis doctoral, 269 p.

- Seligson, K., 2022, The Maya and climate change. Human-Environmental relationships in the classic period Lowlands: New York, Oxford University Press, 305p. <https://doi.org/10.1093/oso/9780197652923.002.0004>
- Seligson, K., Gallareta-Negrón, T., May-Ciau, R., Bey III, G.J., 2017a, Lime Powder Production in the Maya Puuc Region (A.D. 600–950): An Experimental Pit-Kiln: *Journal of Field Archaeology*, 42(2), 129-141. <https://doi.org/10.1080/00934690.2017.1286722>
- Seligson, K., Gallareta-Negrón, T., May-Ciau, R., Bey III, G.J., 2017b, Burnt lime production and the Pre-Columbian Maya socio-economy: A case study from the northern Yucatán: *Journal of Anthropological Archaeology*, 48, 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2017.09.003>
- Seligson, K., Ortiz-Ruiz, S., Barba-Pingarrón, L., 2019, Prehispanic Maya burnt lime production: Previous studies and future directions: *Ancient Mesoamerica*, 30(2), 199-219. <https://doi.org/10.1017/S0956536117000347>
- Toffolo, M.B., Ullman, M., Caracuta, V., Weiner, S., Boaretto, E., 2017, A 10,400-year-old sunken lime kiln from the Early Pre-Pottery Neolithic B at the Neshar-Ramla quarry (el-Khirbe), Israel: *Journal of Archaeological Science: Reports*, 14, 353–364. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.06.014>
- Toffolo, M.B., Regev, L., Dubernet, S., Lefrais, Y., Boaretto, E., 2019, FTIR-based crystallinity assessment of aragonite-calcite mixtures in archaeological lime binders altered by diagenesis: *Minerals*, 9(2), 121. <https://doi.org/10.3390/min9020121>
- Villaseñor-Alonso, I., 2010, Building Materials of the Ancient Maya. A Study of Archaeological Plasters: Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 296 p.
- Villaseñor-Alonso, I., Barba-Pingarrón, L., 2012, Los orígenes tecnológicos de la cal: *Cuicuilco*, 19(55), 11-41.
- Wernecke, D.C., 2005, A stone canvas: Interpreting Maya building, materials, and construction Technology: Texas, University of Texas at Austin, Faculty of Graduate School, tesis de doctorado, 243 p.
- Wernecke, D.C., 2008, A Burning Question: Maya Lime Technology and the Maya Forest: *Journal of Ethnobiology*, 28(2), 200–210. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-28.2.200>
- Wingate, M., 1985, Small-Scale Lime-Burning a Practical Introduction: London, Intermediate Technology Publications, 185 p.