

*Pablo Torres Soria**
*Norma Cristina Peña Peláez**
Moisés Adrián Rodríguez
*Ibarra**

Resumen: En las zonas arqueológicas, los acabados arquitectónicos de tierra registran graves deterioros como exfoliación, pulverulencia, fisuras, disgregación, fracturación y desplomes de tierra ocasionados por la pérdida de adhesividad de la arcilla, sin que hasta la fecha se tenga una solución a estos problemas. Con base en ello, esta investigación aborda el uso de aditivos naturales como el cardón, chamacuerdo y nejayote en la consolidación de acabados arquitectónicos de tierra, en las zonas arqueológicas de Teotihuacán, Tlatelolco y Tula, que permitan fijar, consolidar y estabilizar los materiales de los acabados. El texto expone los trabajos de experimentación en laboratorio y campo, así como de los resultados logrados.

Palabras clave: restauración, acabados, arqueología, arquitectura de tierra, aditivos naturales.

Abstract: In archaeological zones earth architectural finishes display serious deterioration, such as exfoliation, pulverulence, fissures, disintegration, fracturing, and landslides caused by the loss of the clay's adhesiveness, with no solution to these problems until now. This research addresses the use of natural additives such as cardón (elephant cactus), chamacuerdo (spiny nopal), and nejayote (nixtamalization steep waters) in the consolidation of architectural earth finishes in the archaeological zones of Teotihuacan, Tlatelolco, and Tula that make it possible to fix, consolidate, and stabilize material finishes of these structures. The text describes the experimental work in the laboratory and in the field, as well as the results obtained.

Keywords: restoration, finishes, archaeology, earth architecture, natural additives.

Consolidación de acabados arquitectónicos de tierra con tres aditivos naturales: cardón, nopal chamacuerdo y nejayote

Consolidation of Architectural Earth Finishes with Three Natural Additives: cardón, chamacuerdo and nejayote

Los materiales arquitectónicos de tierra son parte de los elementos estructurales: plataformas, pisos, muros, morteros y algunos elementos de acabado, por ejemplo, aplanados, enlucidos y adobes. Con deterioros muy graves evidenciados por exfoliación, pulverulencia, fisuras, disgregación, fracturación y colapso ocasionado por la pérdida de adhesividad de la tierra, requieren de una pronta intervención para su conservación, y protección contra el intemperismo.

En la búsqueda de soluciones para estos problemas se programan ensayos experimentales de laboratorio y campo con muestras representativas de tierra, adobes y morteros, con tres aditivos.

La presente investigación sobre la consolidación de acabados arquitectónicos de tierra se efectuó en las zonas arqueológicas de Teotihuacán (aplanados de tierra en el interior del túnel y en el muro perimetral de adobe de las oficinas administrativas), Tlatelolco (Caja de Agua) y Tula (banqueta del Palacio Quemado), que presentaban graves problemas evidenciados por exfoliación, pulverulencia, fisuras, disgregación, fracturación y desplome.

El interés de probar tres nuevos tipos de aditivos naturales de importancia etnobotánica tuvo como finalidad analizar el comportamiento de éstos para aglutinar, fijar, consolidar, estabilizar y mantener apariencia,

* Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural, INAH.
 Correo electrónico: ptorres.cncpc@inah.gob.mx

forma y volumen de los acabados y elementos estructurales de tierra, problemática hasta el momento sin solución. Por tal motivo se buscaron soluciones ecológicas en la conservación de acabados arquitectónicos de tierra con resultados de corto, mediano y largo plazos, mediante el rescate etnobotánico de plantas mexicanas a través del Proyecto de Investigación “Uso de aditivos naturales en la conservación de acabados arquitectónicos de tierra”, elaborado y aprobado en la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural (CNCPC) y vinculado con los problemas de conservación de acabados arquitectónicos de tierra en las zonas arqueológicas de Teotihuacán, Tlatelolco y Tula.

En dichos sitios, de común acuerdo con los directores Alejandro Sarabia, Salvador Guilliem, Alejandro Gasca, y con los restauradores responsables de proyectos de conservación, Alfonso Cruz, María del Carmen Castro Barrera y Yareli Jáidar, se asignaron y delimitaron pequeñas áreas para practicar los ensayos de consolidación de los aditivos naturales seleccionados para este proyecto. Los resultados obtenidos impactarán en el corto plazo la conservación de acabados arquitectónicos de tierra en las zonas arqueológicas mencionadas.

Los tres aditivos naturales escogidos se obtienen de tres cactáceas, caracterizadas por contener componentes mucilaginosos viscosos hidrosolubles. Las tres especies seleccionadas por su utilidad etnobotánica son: 1) abrojo (*Cylindropuntia tunicata*, F. M. Knuth), 2) cardón o nopalillo (*Cylindropuntia imbricata*, F. M. Knuth y 3) nopal chamacuero (*Opuntia tomentosa* Salm-Dyck), así como el nejayote de nixtamal.

Abrojo

La planta de abrojo es conocida también por los nombres de cholla, clavellina, coyonoxtle, huichacama y tencholote. Es una especie arbustiva originaria de México, de hasta 1 metro de altura, con un tallo principal muy ramificado y con artículos desprendibles fácilmente de 6 a 12 centímetros de longitud y 4 de diámetro; tubérculos prominentes ocultos por las

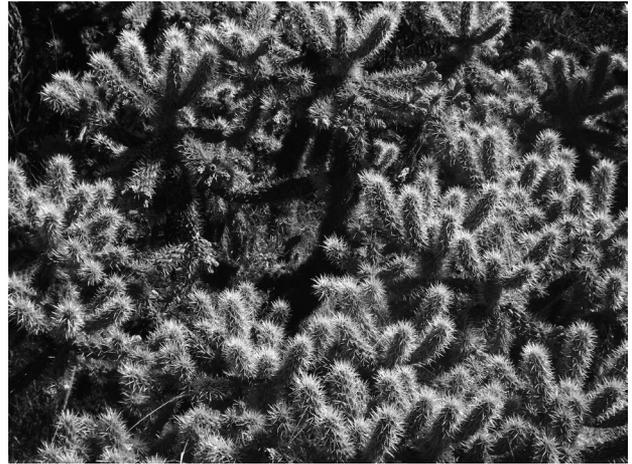


Figura 1. Abrojo. Fotografía: Pablo Torres Soria.

espinas; aréolas con glóquideas amarillentas cubiertas con una vaina papirácea, blanca y brillante; flores amarillas-verdosas de 3 a 5 centímetros de longitud y frutos globosos de 3 centímetros de longitud (Bravo-Hollis, 1978).

La distribución de esta especie abarca las zonas arqueológicas de Teotihuacán y Tula, con una amplia distribución en las entidades federativas ubicadas en el centro de México, además de los estados de Coahuila y Nuevo León, y países en el sur del continente como Ecuador, Perú y Chile (Bravo-Hollis, 1978).

Cardón o nopalillo

El cardón es conocido también con los nombres de abrojo en los estados de México e Hidalgo; cardenche en Durango; coyonostle en Coahuila y Nuevo León; entraña o vela de coyote en Nuevo León, tasajo en Chihuahua y xoconostle en Jalisco y Zacatecas.

Es una planta arbustiva de hasta 5 metros de altura y troncos gruesos, de 10 centímetros de diámetro; los artículos tienen de 12 a 35 centímetros de largo por 2.5 a 3.5 de diámetro; los tubérculos están dispuestos en 3 o 4 series muy prominentes, de 2 a 3.5 centímetros de largo. Las hojas subuladas tienen de 1 a 2.5 centímetros de largo, caducas. Posee aréolas grandes con glóquideas escasas. Dispone de espinas numerosas, de 10 a 30 por aréola, de 1 a 3 centímetros de largo y de color rojizo. Sus flores son púrpuras y numerosas en la extremidad de las ramas, de 5 a 7 centímetros de diámetro. El fruto es tuberculado, amarillo, carnoso, sin espinas, de 2.5 a 4.5 centímetros de largo

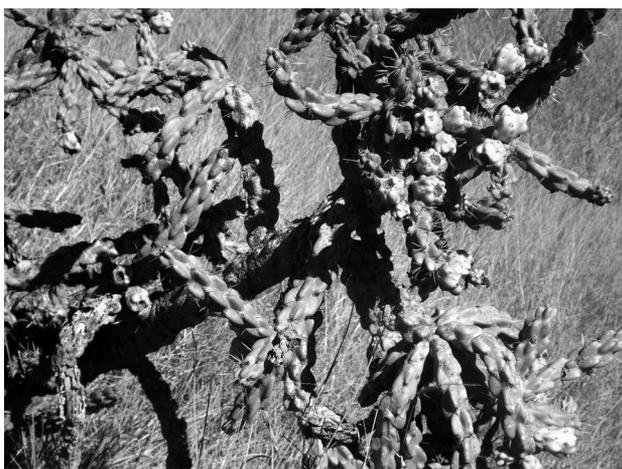


Figura 2. Cardón. Fotografía: Pablo Torres Soria.

por 2 a 3 de diámetro. Las semillas son abundantes, lisas, de 2.5 a 3.5 milímetros de diámetro.

La distribución de esta especie incluye la zona arqueológica de Tula, pero también abunda en los estados del centro del país, Zacatecas, Durango, Coahuila, Chihuahua, Tamaulipas, así como en los estados de Arizona, Nuevo México y Texas de Estados Unidos.

El mucílago de las dos especies, el cardón y el abrojo, contienen arabinosa, galactosa, glucosa, fructuosa, ramosa y sacarosa, fructuosa, utilizados para adulterar el pulque, ya que le proporcionan una viscosidad y consistencia babosa (Ramírez, 2004).

Nopal chamacuero y nejayote

El nopal chamacuero o nopal de San Gabriel es una planta arborescente de tronco liso con altura de 3 a 5 metros, 10 a 30 centímetros de diámetro, ramas abundantes que forman una copa amplia, artículos oblongos, angostamente obovados de 10 a 60 centímetros de longitud con pubescencia aterciopelada, aréolas con glóquidas amarillas, espinas generalmente ausentes, pero cuando existen suman de 1 a 3 de color amarillo. Las flores son anaranjadas, de entre 4 y 5 centímetros de longitud, filamentos blancos con tintes rosas, estilo carmín oscuro, y lóbulos del estigma blancos de 5 a 6 centímetros. El fruto es ovoide de color rojo, con semillas de 4 milímetros de ancho (Bravo-Hollis, 1978).

El mucílago de chamacuero contiene polisacáridos representados por L- Arabinosa, D-Xilosa, D-G- y L-Ramnosa (Bravo-Hollis, 1978).



Figura 3. Nopal chamacuero (*Opuntia tomentosa*). Fotografía: Pablo Torres Soria.

La distribución de esta especie abarca las zonas arqueológicas de Teotihuacán, Tula, y se encuentra en matorrales xerófilos de los municipios de Texcoco, San Martín de las Pirámides, Ixtapaluca, Chicoloapan de Juárez, Chimalhuacán, Huehuetoca, Coyotepec, Tepoztlán, Coacalco de Berriozábal, Ecatepec de Morelos y San Luis Potosí (Calderón y Rzedowski, 1985).

El nejayote es un caldo amarillo en el que se mezclan cal y hollejos de granos de maíz que produce el nixtamal de las tortillerías; es de color amarillo 2.5Y8/8 (Munsell Color Company, 2013), compuesto químicamente por una goma con 47% de xilosa y 28% de arabinosa (Carvajal-Millan *et al.*, 2005). El nejayote es una goma compuesta de polisacáridos (arabinosa y xilosa) (Carvajal-Millan *et al.*, 2005), polifenoles, carbohidratos, gomas y calcio (Niño-Medina *et al.*, 2007).

La investigación sobre el uso de aditivos actualmente cuenta con un presupuesto anual autorizado y aportado por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) de 17 788 pesos, utilizado para trabajos de laboratorio y campo con muy buenos resultados



Figura 4. Tortillería: depósito con nixtamal y nejayote. Fotografía: Pablo Torres Soria.

en la consolidación: adobes, aplanados de tierra de muros y piso, monitoreados durante un año en las zonas arqueológicas de Teotihuacán, Tlatelolco y Tula.

Cabe mencionar que la arquitectura de tierra puede ser afectada por diversos agentes de deterioro naturales, tales como lluvia, viento, granizo, nevadas, inundaciones, corrientes pluviales superficiales, así como vientos saturados de humedad.

El impacto de dichos factores produce deterioros o cambios físicos y químicos evidenciados por la pérdida de cohesión, fisuras, grietas, exfoliación y disgregación superficial, que afectan directamente la estabilidad estructural de los materiales de tierra, por ejemplo, adobes, juntas de barro, aplanados de barro y tierra de relleno de basamentos piramidales.

Respecto de la investigación bibliográfica sobre el uso de aditivos o mucílagos naturales en la conservación de acabados arquitectónicos de tierra, hasta el momento sólo existen dos referencias publicadas: “La goma del nopal: una aportación para la conservación de arquitectura de tierra seca protegida por la techumbre” (Torres *et al.*, 1998), y “La baba y el mucílago de nopal, una alternativa natural para la conservación de acabados arquitectónicos de tierra” (Torres *et al.*, 2015), pero en ninguno se reportan los tres aditivos naturales seleccionados en el presente estudio. Los datos encontrados sobre estas especies señalan otro tipo de funciones: el abrojo tiene usos medicinales ya que se utiliza para la tos, diabetes, quebraduras de huesos, bilis, llagas y úlceras (Biblioteca Digital de la Medicina Tradicional Mexicana, 2009).

En el caso del cardón, el mucílago es utilizado para adulterar el pulque; las plantas vivas, para setos urbanos; los tallos secos, para la manufactura de muebles artesanales y combustible (Bravo-Hollis; 1978), mientras que el nopal chamacuero, en el siglo pasado, se empleó para el cultivo de la grana cochinilla (Bravo-Hollis: 1978) y el mucílago, que es pegajoso, se usó como pegamento (Calderón y Rzedowski, 1985).

El mucílago o parénquima medular de reserva es una sustancia sólida, blanca con textura pegajosa localizada en la porción central de los tallos que, al disolverse en agua, forma una suspensión viscosa, pegajosa, de color ligeramente amarillo o amarillo 5Y8/8 (Munsell Color Company, 2013).

La selección del abrojo y cardón surge de la cultura popular, precisamente en la preparación del pulque, en la población de Coatepec-Ixtapaluca, en el Estado de México. Al constatar el señor Pedro Ríos que el mucílago en el tinacal es muy viscoso y pegajoso, lo utilizó en la comunidad para incrementar la viscosidad o engruesar el pulque. El señor Ríos, además, comenta que antiguamente el tinacal se colocaba en piso de tierra, y al remojar en las tinas los pedazos de tallos del abrojo o cardón con aguamiel para disolver el mucílago, éste ocasionalmente se derramaba sobre la tierra, dejando una superficie fija, compacta y resistente a las maniobras de carga y descarga del pulque.

La idea de considerar el nejayote para las pruebas de consolidación de los acabados arquitectónicos de tierra surge de la conversación sostenida con Sergio Gálvez, propietario de la tortillería y molino La Porfía de San Vicente Chicoloapan de Juárez, Estado de México. Me platicó que la calle del frente de la tortillería antiguamente era de terracería, y para que no se levantara polvo regaban en temporada de secas y fijaban el piso de tierra con nejayote, evitando así las tolvaneras y que la masa se ensuciara con polvo. Recuerda además que, durante las lluvias, la tierra permanecía compacta y resbalosa sin disgregarse al caminar.

Las propiedades que deben tomarse en cuenta de los tres mucílagos para su empleo en arquitectura de tierra con carácter de patrimonio cultural son la de mantener la apariencia original, tener la capacidad

de la higroscopicidad de los materiales originales, pero al mismo tiempo, fijar, consolidar y estabilizar la disgregación de la tierra.

Objetivo general del proyecto

En las zonas arqueológicas de Teotihuacán, Tlatelolco y Tula, consolidar los acabados arquitectónicos de tierra con tres aditivos naturales: cardón, nopal chamacuero y nejayote.

Material y metodología

El cardón se recolectó de las dos especies de nopal: *Opuntia tunicata* y *Opuntia imbricata*, por cierto, muy abundantes en el entorno ecológico de la Zona Arqueológica de Tula. Se cosechó el material por la mañana, sin presencia de viento, para evitar la dispersión de espinas; con el auxilio de guantes de carnaza y machete se pelaron los tallos en la planta, quitando espinas con corteza externa y se cortaron en pedazos de 30 centímetros, después se rajaron longitudinalmente y se transportaron en costales al laboratorio de la CNCPC. Se recogió además el aguamiel de la población de Coatepec-Ixtapaluca. Las proporciones de tallos con aguamiel son: una parte de pedazos de tallos por tres partes de aguamiel, hasta alcanzar la disolución total del mucílago.

El nejayote se recolectó de la tortillería y molino La Porfía, de San Vicente Chicoloapan, y el nopal chamacuero del entorno ecológico de las cuevas del llano de Teotihuacán, localizado entre las puertas 4 y 5 que dan acceso al sitio. Los tallos de las ramas se descortezaron en la planta con el auxilio de un machete y guantes de carnaza; se cortaron los pedazos de tallos de 30 centímetros de largo, se rajaron longitudinalmente y se colocaron en un costal para transportarlos al laboratorio de biología de la CNCPC. Se mezcló un volumen de tallos por tres de agua en botes de plástico de 20 litros para la disolución del mucílago, mediante remociones continuas y el auxilio de un palo, en un plazo de 20 días. A continuación, se separaron las partes leñosas y se tamizó el mucílago en coladores domésticos de plástico.

La recolección de pedazos de adobes antiguos se efectuó en los vestigios de un muro (paredón) ubicado en el centro de la población de Coatepec-Ixtapaluca.

Los ensayos experimentales, que a continuación se describen, comprenden dos etapas de trabajo: actividades de laboratorio y actividades *in situ*.

Trabajo de laboratorio

En el Laboratorio de Biología de la CNCPC se desarrollaron los siguientes cuatro objetivos particulares:

Objetivo 1

Medir el pH (unidad de acidez o alcalinidad) y la viscosidad (consistencia espesa y pegajosa) de los tres aditivos naturales seleccionados y preparados, con la finalidad de tener presente los valores acidez, alcalinidad y fluidez, requeridos para conservar acabados arquitectónicos de tierra.

Procedimiento

En cada uno de los aditivos puros se realizó una medición del nivel de pH con papel reactivo para laboratorio (en tiras reactivas Baker-Phix con valores 0.0-14); se midió la viscosidad expresada en unidades Centipoise,¹ con el viscosímetro portátil Viscolite 700. Los diferentes resultados de estas mediciones de pH y viscosidad se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Medición de pH y viscosidad

Aditivos naturales	pH	Viscosidad (Centipoise)
Cardón	4 ácido	4.1 alta
Chamacuero	7 neutro	3.6 baja
Nejayote	12 alcalino	3.5 baja

Respecto de la tabla 1, los valores de pH registrados en los tres aditivos abarcan la escala las tres unidades (ácido, neutro y alcalino), con diferencias poco significativas en la viscosidad, relacionadas con la fluidez.

¹ Unidad física de viscosidad dinámica del Sistema Cegesimal de Unidades.

dez y métodos de aplicación. Por este motivo se tiene que determinar el porcentaje idóneo de aplicación.

Objetivo 2

Determinar el porcentaje máximo en que pueden aplicarse los tres aditivos naturales por aspersión en agua.

Procedimiento

Se prepararon 10 diluciones de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50% de cada uno de los tres mucílagos de la siguiente manera. En 30 vasos de precipitado de vidrio Pyrex de capacidad de 1 litro se agregó, con el auxilio de pipetas graduadas de 10 milímetros, cada uno de los porcentajes de los tres aditivos. A continuación se agregó agua de la llave y con un agitador de vidrio se removieron hasta homogeneizar la mezcla. En seguida se llenaron aspersores manuales de 1.2 litros de uso rudo, logrando transformar el flujo de la dilución presurizada en rocío, sólo las proporciones de 5 y 10% fueron seleccionados para aplicarlos por aspersión en los adobes antiguos, a efecto de fijar y consolidar la disgregación de la tierra.

Objetivo 3

Consolidar los adobes con los tres aditivos naturales aplicados por los métodos de aspersión en proporcio-

nes de 5 y 10% en agua, mientras que los aditivos puros fueron aplicados con brocha, midiendo en cada uno de los adobes consolidados la dureza e higroscopicidad adquirida.

Procedimiento

Los adobes son de color café mate con graves problemas de disgregación de tierra al tacto con los dedos. Para hacer los ensayos de consolidación se dejó un adobe como testigo, sin ningún tipo de tratamiento; se formaron tres grupos de tres ladrillos cada uno: en total nueve. El primer grupo consolidado con cardón al 5 y 10% fue aplicado por aspersión y puro con brocha de la siguiente manera. Con objeto de fijar la tierra superficial disgregable y de lograr una mayor penetración del aditivo, se inicia la consolidación con 5% de proporción en tres repeticiones continuas en forma de bandas alternas horizontal y vertical, seguida de la aspersión de 10% con el mismo procedimiento, finalizando el proceso con la aplicación de cardón puro con brocha y tres manos continuas en bandas alternas. Para el segundo grupo de adobes consolidados por aspersión con chamacuero en proporción de 5 y 10% y puro con brocha, se sigue el mismo procedimiento. En el tercer grupo de adobes consolidados con nejayote al 5 y 10% y puro con brocha se aplicaron tres manos

Tabla 2. Valores de dureza en la escala de Mohs

Dureza	Mineral	Se raya con / raya a	Composición química
1	Talco	Se puede rayar fácilmente con la uña	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	Yeso	Se puede rayar con la uña con más dificultad	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcita	Se puede rayar con una moneda de cobre	$CaCO_3$
4	Fluorita	Se puede rayar con un cuchillo de acero	CaF_2
5	Apatita	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo	$Ca_4(PO_4)_3 (f, Cl, OH)$
6	Ortosa	Se puede rayar con una lija para el acero	$KAlSi_3O_8$
7	Cuarzo	Raya el vidrio	SiO_2
8	Topacio	Rayado por herramientas de carburo de wolframio	$Al_2SiO_4(OH,F)_2$
9	Corindón	Rayado por herramientas de carburo de silicio	Al_2O_3
10	Diamante	El material más duro en esta escala (rayado por otro diamante)	C

continuas, suficientes hasta que dejaran de absorber los mucílago. Se esperó el secado completo de los adobes tratados para medir dos características físicas: la dureza y la higroscopicidad. La dureza es la resistencia que oponen los adobes al rayado con lápices de acuerdo con los valores especificados en la tabla de Mohs.

La higroscopicidad en los acabados arquitectónicos de tierra es la capacidad de absorber el agua; en este caso se mide con el auxilio de una pipeta, aplicando una gota de agua sobre la superficie de los adobes y registrando el tiempo en segundos o minutos que tardan en absorberla los adobes.

A continuación, en la tabla 3 se especifican los resultados obtenidos de dureza e higroscopicidad en los adobes consolidados con cardón y nopal chamacuero. Conservan la apariencia original, están muy bien consolidados, más duros, con valores de 5 que equivalen a la dureza del mineral apatita (se puede rayar difícilmente con un cuchillo); son más impermeables: de 22 segundos a 32 minutos, en comparación con el testigo (2 segundos), tarda en absorberse la gota de agua. Los adobes impregnados con nejayote observan zonas de color café mate con tonalidades oscuras, blancas, con fisuras, escamas, disgregación al tacto con los dedos con valor de dureza 2 equivalente al yeso (se puede rayar con la uña con más dificultad) (véase la tabla 3).

De acuerdo con la tabla 3, los adobes consolidados con aditivos de cardón y nopal chamacuero presentan valores idénticos en la dureza, superando al testigo y al nejayote con disgregación de tierra.

Es importante señalar que, durante la consolidación de los muros de adobes, es común que se usen morteros de arcilla y cal a base de agua para aplicar resanes y ribetes en zonas de pérdidas mayores. Durante este proyecto, los participantes acordaron sustituir el agua empleada usualmente para preparar estos morteros por los aditivos naturales, con el objetivo de mejorar la adhesividad, dureza e higroscopicidad de la arcilla al contacto con el líquido vital.

Tabla 3. Relación de dureza e higroscopicidad

Adobes	Aditivos	Dureza	Higroscopicidad
Testigo	Agua	1 con disgregación	2 segundos
Grupo 1	Cardón	5 sin disgregación	22 segundos
Grupo 2	Nopal chamacuero	5 sin disgregación	32 minutos
Grupo 3	Nejayote	2 con disgregación	3.44 minutos

Objetivo 4

Sustituir el agua en aplanados finos de tierra por cardón, nopal chamacuero, nejayote a 10% en agua con dos variantes de cal: de piedra apagada y cal hidratada químicamente pura comercializada en sacos de papel de 25 kilogramos, ambas utilizadas en la conservación del patrimonio cultural, para preparar los morteros requeridos en los resanes y ribetes. Asimismo, medir las características físicas de adhesividad, dureza e higroscopicidad.

Metodología de preparación de morteros de tierra con los aditivos naturales

La selección del mortero para elaborar aplanados finos de tierra se tomó de la formulación que preparan los tabiqueros de San Vicente Chicoloapan y Coate-



Figura 5. Mortero de tierra con cuatro muestras de aplanados finos. De izquierda a derecha: testigo, nejayote, nopal chamacuero y cardón. Fotografía: Pablo Torres Soria.

pec-Ixtapaluca en el Estado de México, para la elaboración de adobes, aplanados y tabiques.

La fórmula es la se describe a continuación: en una proporción de 7:1:1 (siete partes de barro suave + 1 parte de arena de tezontle negro de grano medio lavada + 1 parte de cal de piedra o cal química pura hidratada en polvo mezclada con cada uno de los aditivos a 10% en agua) se prepara el mortero del

modo que sigue: sobre un adobe se traza una línea a la mitad; en cada parte se delinearán cuatro franjas de 10 centímetros cada una, para sumar cuatro en cada mitad y hacer un total de ocho; sobre la superficie de cada uno de los dos testigos se asperjó agua y en las seis restantes se aplicó el mucílago correspondiente hasta que dejó de absorberlo, repitiendo el proceso cuatro veces continuas sin dejar secar la superficie.

Tabla 4. Morteros para aplanados finos de tierra con dos variantes de cal: cal de piedra apagada y cal química pura hidratada en polvo con cardón, nopal chamacero y nejayote, con valores diferentes en adhesividad, dureza e higroscopicidad

Aplanados finos de tierra	Adhesividad	Dureza	Higroscopicidad
1. (7:1:1) barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + agua (testigo)	Sin adherencia	2.0	1 segundo con disgregación instantánea
2. (7:1:1) barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal pura hidratada + agua (testigo)	Sin adherencia	2.0	1 segundo con disgregación instantánea
3. (7:1:1) barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + cardón al 10%	Muy adherente	5.0	7.16 segundos sin disgregación
4. Tierra (7:1:1) barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal pura hidratada + cardón al 10%	Muy adherente	5.0	6.48 segundos sin disgregación
5. Tierra (7:1:1) barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + chamacero al 10%	Ligeramente adherente	3.0	4.5 segundos Con ligera disgregación al tacto
6. Tierra (7:1:1) barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal pura hidratada + chamacero al 10%	Ligeramente adherente	3.0	4 segundos con ligera disgregación al tacto
7. Barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + nejayote al 10%	Sin adherencia	3.0	Impermeable sin disgregación
8. Barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal pura hidratada + nejayote al 10%	Sin adherencia	3.0	Impermeable sin disgregación

Este proceso tiene el propósito de que el aplanado nuevo se fije fuertemente en los adobes y al secarse no se desprenda. Inmediatamente, sin dejar secar el adobe impregnado de mucílago, se preparó el mortero en un godete mezclando el barro suave con la arena de tezontle; después se agregó la pasta de cal y se mezclaron bien los tres materiales; posteriormente se agregó el mucílago correspondiente y se mezcló nuevamente con la espátula. Cabe resaltar que se observa la adhesividad del mortero de lodo de la siguiente manera: se presiona una pequeña cantidad de la mezcla entre el pulgar y el índice de los dedos para comprobar su adherencia: 1) no adherente (el lodo no se queda pegado a los dedos); 2) ligeramente adherente (el lodo queda pegado en ambos dedos, pero uno queda limpio al separarlos,) y 3) muy adherente (el lodo queda pegado en ambos dedos y, al momento de separarlos, se forma un hilo continuo sin que se rompa). El lodo se coloca con la espátula sobre la superficie del adobe, previamente impregnada con el mucílago del lodo preparado, se extiende la pasta presionándola hasta formar los aplanados finos de tierra, dejándolos secar para medir la dureza y la higroscopicidad.

En la tabla 4, los resultados obtenidos de los aplanados finos de tierra revelan diferencias significativas en la adhesividad (sin adherencia y muy adherente), en la dureza (con valores de 2 a 5 en la escala de Mohs) y en la higroscopicidad (permeable o impermeable). En el primer caso, para los testigos 1 y 2 sin aditivos, la pasta de lodo no tiene adhesividad, cuenta con 2.0 de dureza y 1 segundo de higroscopicidad: es decir, el tiempo que tarda el aplanado en absorber la gota de agua, con una disgregación instantánea de la tierra. Los morteros 3 y 4, con cardón, son muy adherentes o pegajosos en aplanados con un incremento en la dureza de 2 a 5, poco permeable con valores de 6 a 7 segundos, sin disgregación de la tierra en comparación con los aplanados testigos. Los morteros 5 y 6, con nopal chamacuero, son ligeramente adherentes, incrementan la dureza de 2 a 3, permeables al agua entre 4 y 5 segundos, con ligera disgregación de tierra. Los morteros 7 y 8 con nejayote no tienen adherencia, incrementan la dureza de 2 a 3, y son impermeables al agua y sin disgregación de tierra.

Se ha podido comprobar que la sustitución del agua por mucílagos de cardón y nejayote en los aplanados finos de tierra es una muy buena opción de mantenimiento para incrementar la dureza, prolongar la durabilidad y evitar la disgregación de la tierra; asimismo, se cuenta con diversas opciones para elegir un mortero permeable o impermeable, según sea el caso requerido en la conservación de acabados arquitectónicos de tierra. De los tres aditivos, cardón, nopal chamacuero y nejayote, ensayados con morteros de tierra en aplanados finos con barro suave requeridos para resanes y ribetes, sólo el cardón y el nejayote funcionan por no observar disgregación, a diferencia de lo que ocurre con el nopal chamacuero, que presenta poca adhesividad y una ligera disgregación de tierra; por esta razón no sirve (tabla 4).

Trabajo de campo

Como objetivo 5 se tuvo la consolidación de adobes *in situ* y recubrimientos con aplanados de tierra fina para su protección contra el intemperismo.

Sitio de estudio

En la Zona Arqueológica de Teotihuacán, el muro de adobes de las oficinas administrativas experimenta graves problemas de deterioro, evidenciados por la disgregación y los desprendimientos de fragmentos, siendo necesario reponer los faltantes con aplanados nuevos de tierra, sin obtener resultados satisfactorios hasta el momento. Por este motivo, el director de la zona, Alejandro Sarabia, nos pidió hacer pruebas experimentales con los aditivos naturales con la idea de encontrar la mejor solución para consolidar los adobes y protegerlos con aplanado de tierra resistente al intemperismo.

1) Ensayos experimentales para la consolidación de los adobes mediante el uso de tres mucílagos: cardón, nopal chamacuero y nejayote al 5 y 10%, así como aditivos puros aplicados con aspersión, brocha y utilizados en aplanados finos de tierra en proporciones de 7:1:1 (barro suave + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra) con mucílagos de cardón, nopal chamacuero y nejayote.

Procedimiento de la consolidación de adobes

En el muro de adobes se delimitaron y marcaron tres áreas de aproximadamente 50 cm² cada una, en las cuales se aplicaron los mucílagos preparados previamente en el laboratorio de la CNCPC de la siguiente manera.

En la primera se aplicó mediante el auxilio de un aspersor manual de uso rudo Gimex Modelo 2000 de 2 litros de capacidad; para ello se colocaron en el depósito 1.5 litros de dilución de cardón a 5% en agua; se presurizó al máximo con la bomba de aire y se asperjó cinco veces continuas. Inmediatamente, sin dejar secar se roció con cardón a 10%, con cinco repeticiones continuas; y, por último, se aplicó el cardón puro, tres manos con brocha. Sin dejar secar sobre estas mismas áreas, se aplicaron los morteros en la siguiente proporción: 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra) mezclado con el mucílago correspondiente: cardón, nopal chamacuero y nejayote a 10% en agua, aplicados con una espátula, presionando el mortero contra los adobes para dar un acabado superficial de una textura fina. Se dejó secar y se marcaron mediciones con lápices de dureza variable con los siguientes resultados.

Resultados

En los ensayos experimentales de la consolidación de adobes con los tres aditivos naturales: cardón, nopal chamacuero y nejayote, aplicados por aspersión a 5 y 10% en agua, y puros sin diluir por brocha, sólo el cardón consolidó los adobes, incrementado la dureza en la arcilla de 1 a 4 en la escala de Mohs, sin disgregación ni cambio en la apariencia original, aunque el nopal chamacuero y el nejayote también incrementaron la dureza de 1 a 3, pero con disgregación superficial de arcilla, en el primer caso, y disgregación superficial de tierra y cambio en la apariencia original por un color ligeramente amarillento, en el segundo caso (figura 6).

Se aplicaron los aplanados finos de barro suave mezclado con cardón, nopal chamacuero, nejayote a 10% en agua y untados sobre los adobes previamente consolidados con los mismos aditivos al 5 y 10%, y

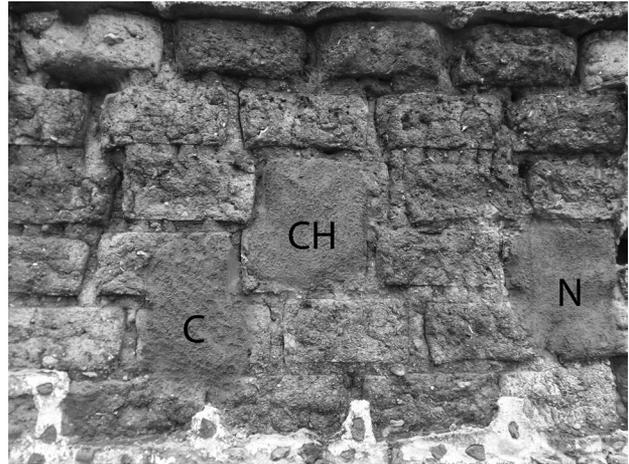


Figura 6. Muro de adobe antiguo de las oficinas administrativas de la Zona Arqueológica de Teotihuacán: C = cardón con aplanado fino de tierra de 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra); CH = nopal chamacuero con aplanado fino de tierra de 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra), y N = nejayote con aplanado fino de tierra de 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra). Fotografía: Pablo Torres Soria.

puros sin diluir. Con la acción de protegerlos contra el intemperismo, resultaron viables para dicho propósito dos aditivos: cardón y nejayote; el primero incrementa la dureza en el aplanado de 1 a 5 en la escala de Mohs, sin disgregación de arcilla, permeable al agua de lluvia sin pérdida en la estabilidad ni cambio de apariencia. El segundo también incrementa la dureza de 1 a 3, sin disgregación y es impermeable al impacto pluvial. En este caso los aplanados con nopal chamacuero, pese al incremento en la dureza de 1 a 3, presentan disgregación y son permeables al agua de lluvia con pérdida de estabilidad en los aplanados (figura 6).



Figura 7. Banqueta de adobes con disgregación y desplome de tierra en los adobes adjuntos al piso. Fotografía: Pablo Torres Soria.

Objetivo 6

En la Zona Arqueológica de Tula: consolidar con cardón los adobes de la banqueta del Palacio Quemado.

La banqueta de adobes, pese a estar protegida por una cubierta, tiene problemas serios de disgregación de tierra, ocasionados por la pérdida de adhesividad, siendo más evidente ese deterioro en los adobes de la primera hilada en los que se observa desplome de tierra (figura 7).

Palacio Quemado: procedimiento de consolidación de los adobes de la primera hilada adjunta al piso
La consolidación de los adobes con cardón a 5 y 10% en agua, por el método de aspersión aplicando el primer valor, seguido del segundo y repitiendo en forma continua la aplicación cinco veces por cada cifra, inmediatamente precede a la aplicación de tres manos continuas con brocha; a continuación hay que dejar que se sequen los adobes para, finalmente, medir la dureza del material.

Resultados

Los adobes de la primera hilada de la banqueta consolidada con cardón a 5 + 10% + puro sin diluir, adquirieron una dureza menor de 1.0 a 5.0 en la escala de Mohs, equivalente al apatita (se puede rayar difícilmente con un cuchillo); los ladrillos estaban muy



Figura 8. Banqueta de adobes en el Palacio Quemado de Tula. La restauradora Norma Peña asperja el cardón a 5 y 10% en los adobes de la primera hilada adjunta al piso con problemas serios de disgregación. Fotografía: Pablo Torres Soria.

bien consolidados y duros, sin dejar capa superficial ni alterar la apariencia original y sin disgregación de arcilla al tacto.

La banqueta de adobes (figura 8); pruebas experimentales de consolidación con los tres mucílagos: cardón, nopal chamacuero y nejayote aplicados primero por aspersión a 5 y 10% y después puros sin diluir impregnados con brocha.

Procedimiento

Se midió la dureza de cada uno de los adobes del muro; se trazaron tres franjas del mismo tamaño abarcando el largo y ancho para aplicar por aspersión y brocha las tres variantes: cardón, nopal chamacuero



Figuras 9 y 10. Banqueta de adobes. Lado izquierdo: la restauradora Norma Peña asperjando los aditivos; lado derecho: el biólogo Moisés Rodríguez aplicando aditivos con brochuelo. Fotografías: Pablo Torres Soria.

y nejayote a 5 y 10%, diluidos en agua, aplicados cuatro veces con aspersión en cada uno, y sin diluir impregnados cuatro veces también, pero ahora con brochuelo (figuras 9 y 10).

Resultados

La dureza de los adobes antes del tratamiento alcanzó un valor de 1, equivalente al talco, que se puede rayar fácilmente con la uña. Después de la aplicación de los aditivos, los adobes consolidados con cardón mantuvieron la apariencia original: la tierra está muy bien fijada, se siente firme y dura al tacto, sin disgregación, con un incremento de 1 a 4 (fluorita) en los valores de dureza; es decir, que sólo se puede rayar con un cuchillo. Los adobes consolidados con nopal chamacuerdo conservaron la apariencia original; la tierra está fija, firme al tacto sin disgregación, con un incremento de 1 a 3 (calcita) en los valores de dureza; es decir, que sólo se puede rayar con una moneda de cobre.

Los adobes consolidados con nejayote experimentaron un cambio en su apariencia, detectándose un tono amarillento; formó escamas con desprendimiento de tierra y disgregación. Se incrementó de 1 a 2 los valores de dureza (equivalente a yeso); es decir, se puede rayar con la uña. Por segunda ocasión se constató experimentalmente que el nejayote no sirve para consolidar los adobes.

Objetivo 7

Determinar el mucílago idóneo para conformar morteros en aplanados de tierra fina, necesarios para la protección de los adobes.

Sitio de estudio: banquetta del Palacio Quemado (lado izquierdo)

Ensayos experimentales con cuatro muestras de aplanado fino de tierra en proporción de 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + agregar alguno de los tres mucílago: cardón, nopal chamacuerdo, nejayote diluidos en agua al 10%).

Muestra 1: testigo 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + agua).



Figura 11. Lado izquierdo de la banquetta de adobes del Palacio Quemado de la Zona Arqueológica de Tula con el ensayo experimental de cuatro muestras de aplanado fino de tierra elaborados con los tres mucílago: T: (testigo), C: (cardón), CH: (nopal chamacuerdo) y N: (nejayote a 10%). Fotografía: Pablo Torres Soria.

Muestra 2: 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + cardón diluido en agua al 10%).

Muestra 3: 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + chamacuerdo diluido en agua al 10%).

Muestra 4: 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + nejayote diluido en agua al 10%).

Procedimiento para hacer las muestras experimentales de aplanado fino de tierra sobre el muro de adobes

Para comenzar el tratamiento del testigo se debe aplicar agua por aspersión, mientras que se deben aspergear cuatro veces los tres adobes restantes, cada uno con su mucílago a 5 y 10% diluidos en agua; después se impregnan con brocha tres veces seguidas los mucílago sin diluir. De manera paralela se preparan los morteros en godetes, con el auxilio de una espátula para los testigos; a continuación, se mezcla el barro

con el tezontle, se agrega la pasta de cal, se revuelven por segunda vez, se añade agua y se mezcla por tercera vez, tras lo cual se coloca el mortero sobre el adobe, aplanando y presionando con la espátula.

El procedimiento descrito se aplica para los tres morteros, sustituyendo el agua por los mucílagos: cardón, nopal chamacuerdo y nejayote a 10%. Tras impregnarlos se aplanan con una espátula, presionándolos contra el adobe, marcándolos con la letra inicial de los mucílagos y el testigo: C, CH, N, T; finalmente se dejan secar y se miden los valores de dureza e higroscopicidad adquiridos.

Se practicaron ensayos experimentales, en laboratorio y en campo, al sustituir agua por aditivos sin diluir, mezclados con morteros de tierra en aplanados finos de barro suave en las siguientes proporciones: 7 volúmenes (barro suave de grano medio), 1 volumen (arena de tezontle de grano medio lavada), 1 volumen (cal de piedra apagada), mezclado todo con cada uno de los tres aditivos: cardón, nopal chamacuerdo y nejayote, puros sin diluir, con en el auxilio de godetes, espátulas y cucharillas.

Para hacer los aplanados, previamente se moja la superficie de los adobes con cada uno de los aditivos puros sin diluir aplicados con brocha; de inmediato se prepara el mortero, aplicándolo sobre el adobe con

auxilio de una espátula o cucharilla, presionándolo contra la base hasta dejar un aplanado bien pulido y con acabado fino; después se deja secar y se mide la dureza con el lápiz, registrando un incremento de 2 a 4 en dicho valor. El aplanado de mortero con nopal chamacuerdo es permeable al agua con disgregación de tierra, mientras que el aplanado de mortero con nejayote registra de 2 a 3 en valores de dureza, y es impermeable al agua sin disgregación de tierra. En este caso, los aplanados finos de tierra con cardón y nejayote son los idóneos para la protección de los muros de adobe, particularmente en la Zona Arqueológica de Paquimé, en Casas Grandes, Chihuahua. El nopal chamacuerdo definitivamente no funciona en aplanados finos de tierra, por lo tanto, no se recomienda (véase la tabla 5).

Objetivo 8

Seleccionar el mucílago idóneo para consolidar el aplanado de tierra del interior del túnel principal localizado debajo del basamento del primer cuerpo de la fachada principal en la Pirámide del Sol.

Planteamiento del problema

En la Zona Arqueológica de Teotihuacán, durante las dos épocas de secas el túnel de la Pirámide del Sol registra un incremento en la humedad relativa de 68.2 a

Tabla 5. Las cuatro muestras experimentales de aplanado fino de tierra registran diferentes valores en dureza e higroscopicidad, encontrando útiles sólo dos aditivos: cardón y nejayote para hacer los morteros con tierra.

Aplanado fino de tierra	Dureza	Higroscopicidad
Muestra 1 (testigo). 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + agua).	2.0	8 segundos con disgregación
Muestra 2. 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + cardón puro).	4.0	30 segundos sin disgregación
Muestra 3. 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + nopal chamacuerdo puro).	4.0	1.54 segundos con ligera disgregación
Muestra 4. 7:1:1 (barro suave de grano medio + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + nejayote puro).	3.0	Impermeable sin disgregación



Figuras 12 y 13. Túnel de la Pirámide del Sol con aplanado con grietas y desplome de tierra. Fotografía: Pablo Torres Soria.

82.7%, lo cual ocasiona afectaciones en la estabilidad de los aplanados de tierra de 4 centímetros de grosor, produciendo deterioros evidentes, principalmente por grietas y desplome (12 y 13).

Procesos de fijado y consolidación de los aplanados de tierra en el interior del túnel

En el interior del túnel, sobre los aplanados de los dos muros, se ubicó un total de 19 sitios marcados y numerados con claves que van del S1 al S19, para efectuar ensayos de consolidación de aplanado de tierra con tres aditivos: cardón, nopal chamacuero y nejayote, aplicados por tres métodos: aspersión, brocha e inyección (figura 16 y tabla 6).

Aspersión de los aditivos

Para asperjar los mucflagos con aire inyectado por una bomba, se presuriza al máximo la dilución del aditivo contenido en el depósito del aspersor manual. Dicho procedimiento debe realizarse de modo homogéneo y de forma continua en cuatro bandas alternas: 2 horizontales y 2 verticales para cubrir completamente la superficie sin saturación, repitiendo cuatro veces la aspersión; sin duplicar las bandas, éste es el momento en que los aplanados de tierra ya no absorben los aditivos. Véase el esquema de la aplicación (figura 14 y 15).

Inyección de los aditivos

La inyección de los aditivos puros sin diluir en el aplanado de tierra se lleva a cabo con el auxilio de jeringas de plástico, introduciendo el aditivo hasta el

fondo de la abertura de las grietas con objetivo de estabilizar la tierra en la base del aplanado.

Respecto de los aplanados, según el grado de daños fueron seleccionados seis sitios críticos del aplanado marcados en el croquis de la figura 16 y en la tabla 6 con las claves siguientes: S1, S2, S6, S10, S14 y S17, por su avanzado estado de disgregación al tacto, con el objetivo de fijarlos y consolidarlos con alguno de los tres aditivos: nejayote, nopal chamacuero y cardón diluidos en agua a 10% y aplicados en forma continua por dos métodos: aspersión y puros sin diluir, y por inyección con el auxilio de jeringas de plástico para introducir los aditivos en el fondo de las grietas a efecto de fijar, consolidar y estabilizar los aplanados (véase figuras 12 y 13).

Los sitios marcados en el croquis con S3 y S9, especificados en la tabla 6, fueron seleccionados por presentar superficialmente una ligera disgregación al tacto; se probó fijarlos y consolidarlos con cardón, aplicado primero con aspersión a 10% de forma continua en cuatro bandas alternas, dos horizontales y dos verticales hasta impregnarla, sin saturar la superficie de los aplanados con un total de cuatro aplicaciones, procedimiento seguido de la consolidación de la tierra con cardón puro sin diluir aplicado con brocha.

En el último procedimiento se utilizan cerdas de ixtle; los aditivos diluidos se colocan en jarras de plástico o pocillos de peltre de 3 litros, la brocha se introduce en el mucflago, se le deja escurrir sobre la pared del pocillo al sacarla, se levanta y se gira para cortar el hilo formado por el mucflago y enseguida se pone en contacto con la superficie del aplanado para

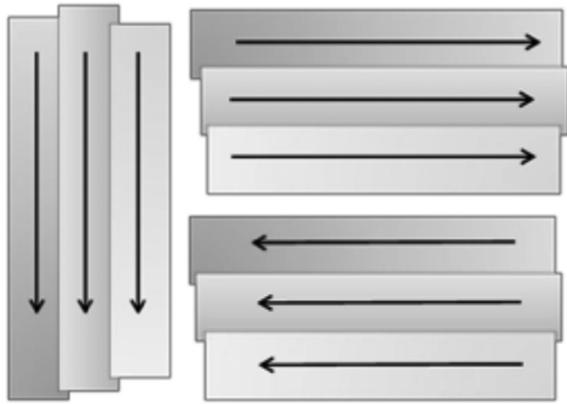


Figura 14. Forma correcta de aplicar en bandas los aditivos naturales por los métodos de aspersión y brocha, encimando un poco la segunda. Esquema: Norma Peña.

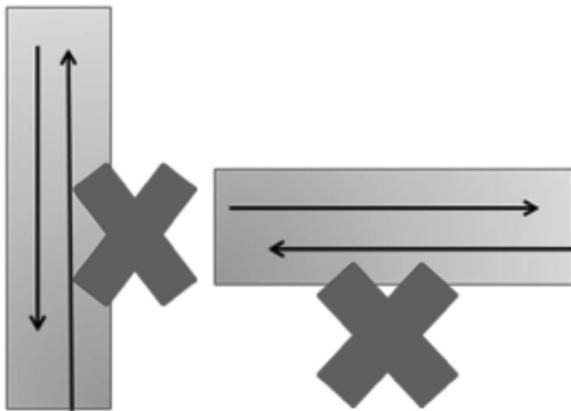


Figura 15. Forma incorrecta de aplicar los aditivos naturales, ya que no se debe regresar sobre la misma banda. Esquema: Norma Peña.

impregnarlo con 4 bandas alternas, 2 horizontales y 2 verticales, de la siguiente manera: respecto de las dos primeras bandas, una se traza de izquierda a derecha, deslizándose lentamente la brocha sobre la superficie hasta uno de los extremos; a continuación se levanta la brocha, se vuelve a mojar con el mucílago y se aplica una segunda banda deslizándose lentamente la brocha de derecha a izquierda. Las bandas verticales se aplican con el mismo procedimiento que las horizontales, excepto que la dirección de la primera va de arriba hacia abajo, y la de la segunda va de abajo hacia arriba; sin regresar sobre la primera banda para evitar la saturación de la superficie. Con esta alternancia en los brochazos, el aplanado ya no absorbe más aditivos, y no forma ni deja capa sobre la superficie de las 4 manos o repeticiones aplicadas (véase el esquema del sistema de aplicación por brocha de los aditivos).

En los sitios del croquis marcados con los números: 1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 14, 17 se aplican por aspersión, inyección y brocha los tres aditivos (véase la ubicación de los sitios en el croquis y el desglose de las formulaciones de los aditivos en la tabla 6).

Resane de los aplanados de tierra

Los morteros para resanar se preparan en godetes de hule, una mezcla de 7 volúmenes de barro suave (que no se agrieta al secado) + 1 volumen de arena negra de tezontle de grano medio lavada (que se mezcla muy bien) + 1 volumen de cal de piedra (7:1:1), que se mezcla por segunda vez, y se agregan por último los aditivos puros, se revuelven bien por tercera ocasión, en tanto que el mortero se aplica con el auxilio de una espátula o cucharilla presionándolo contra las paredes del hueco, se deja secar y se mide la dureza adquirida al rayar la superficie con lápices.

Ribeteo de aplanados de tierra

Los cinco aplanados de tierra seleccionados por presentar grietas profundas (figura 12) están marcados en el croquis con S5, S8, S13, S16 y S19, con el objetivo de reforzar las orillas de las grietas: primeramente, se fijan con aditivos de cardón, nopal chamacuero y nejayote diluidos en agua a 10%, y aplicados por aspersión solamente una vez, seguidas del reforzamiento de

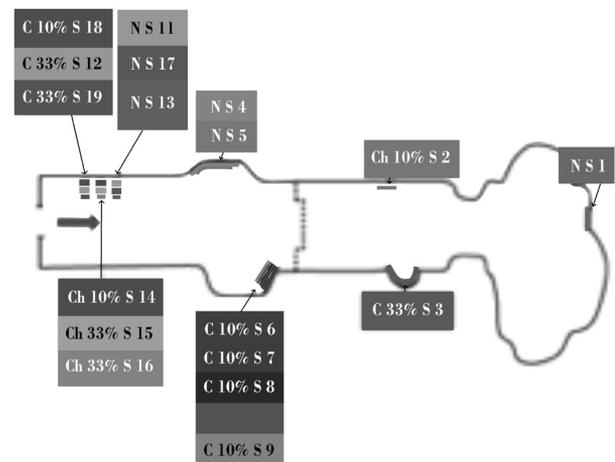


Figura 16. Croquis interior del túnel con ubicación de los 19 sitios experimentales marcados con cada uno de los tres aditivos: C = cardón, CH = nopal chamacuero, N = nejayote, en porcentajes de 10 y 33% (puros sin diluir). Imagen: Norma Peña.

Tabla 6. Relación de muestras, aditivos y aplicaciones

Núm. de muestra	Aditivo	Aplicación
N S 1	Nejayote	10% diluido en agua aplicado por aspersión e inyectado puro sin diluir
Ch S 2	Nopal chamacuerdo	10% diluido en agua aplicado por aspersión y puro 33% diluido en agua aplicado con inyección
C S 3	Cardón	10% diluido en agua aplicado y puro sin diluir aplicado con brocha
N S 4	Nejayote	Resane de barro suave + arena de tezontle de grano medio + cal de piedra + nejayote puro (7:1:1)
N S 5	Nejayote	Ribete de barro suave + arena de tezontle de grano medio + cal de piedra + nejayote puro (7:1:1)
C S 6	Cardón	10% diluido en agua aplicado por aspersión y puro 33% diluido en agua aplicado con inyección
C S 7	Cardón	Resane de barro suave + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + cardón diluido a 33% en aguamiel (7:1:1)
C S 8	Cardón	Ribete de barro suave + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + cardón puro diluido a 33% (7:1:1)
C S 9	Cardón	10% diluido en agua aplicado por aspersión y puro sin diluir aplicado con brocha
C S 10	Cardón	10% diluido en agua aplicado por aspersión y puro 33% diluido en agua y aplicado con inyección
N S 11	Nejayote	Puro aplicado por aspersión
C S 12	Nejayote	Resane de barro suave + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + nejayote puro (7:1:1)
N S 13	Nejayote	Ribete de barro suave + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + nejayote puro a 33% (7:1:1)
Ch S 14	Nopal chamacuerdo	Diluido a 10% en agua y aplicado por aspersión, y puro 33% diluido en agua aplicado con inyección
Ch S 15	Nopal chamacuerdo	Resane de barro suave + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + nopal de chamacuerdo al 33% diluido en agua (7:1:1)
Ch S 16	Nopal chamacuerdo	Ribete de barro suave + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + nopal chamacuerdo al 33% diluido en agua
N S 17	Cardón	Diluido a 10% en agua, aplicado por aspersión
C S 18	Cardón	Resane de barro suave + arena de tezontle de grano medio lavada + cal de piedra + cardón a 33% diluido en aguamiel (7:1:1)
C S 19	Cardón	Ribete de barro suave + arena de tezontle de grano medio lavada + cardón diluido a 33% en aguamiel (7:1:1)

Los nueve sitios: 1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 14 y 17 consolidados con cardón, nopal chamacuerdo y nejayote diluidos 10% en agua y puros sin diluir aplicados por aspersión, inyección y brocha. Los cinco sitios: S4, S7, S12, S15 y S18, resanados con mortero de tierra mezclado con los tres aditivos puros sin diluir: cardón, nopal chamacuerdo y nejayote. Los cinco sitios: S5, S8, S13, S16 y S19, ribeteados con mortero de tierra mezclado con los tres aditivos puros sin diluir: cardón, nopal chamacuerdo y nejayote.

las orillas con mortero de tierra mezclado con cardón, nopal chamacuero y nejayote sin diluir.

Los morteros para el ribeteo se preparan en godeltes de hule, una mezcla de 7 volúmenes de barro suave (que no se agrieta al secado) + 1 volumen de arena negra de tezontle de grano medio lavada (se mezclan muy bien) + 1 volumen de cal de piedra (7:1:1), que se mezcla por segunda ocasión, y por último se agregan los aditivos puros, revolviéndose bien por tercera ocasión, mientras que el mortero se aplica con una espátula o cucharilla en las orillas de las grietas presionándolo ligeramente, se deja secar y se mide la dureza adquirida rayando la superficie con lápices.

Resultados de la consolidación de aplanado de tierra en el interior del túnel

En los 19 sitios experimentales se incrementó de 2 a 4 los valores de dureza en la escala de Mohs, con un

valor intermedio de 3, siendo menor en 4 sitios con resane y 5 con ribetes en nejayote diluido a 10% en agua, pero hubo cambios en la apariencia. En 12 de los sitios (1, 2, 3, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19) tratados con cardón, nopal chamacuero y nejayote diluidos a 10 y 33% en agua, 33% en aguamiel y puros aplicados por los métodos de aspersión, inyección y brocha, mantuvieron la apariencia original excepto los sitios 1, 4, 11, 12 y 13, cambiando en apariencia el aplanado, los resanes y ribetes, registrando un valor de dureza de 3 en 12 de los sitios, equivalente a la calcita (se puede rayar con una moneda de cobre sin disgregación al tacto). En los sitios con los números 6, 7, 8, 9 y 10, tratados con cardón diluido 10% en agua y puro sin diluir aplicado con aspersión, inyección y brocha, los aplanados, resanes y ribetes mantuvieron la apariencia original y se observaban muy bien consolidados, registrando un valor de dureza de 4, equi-

Tabla 7. Los 19 sitios experimentales en aplanados de tierra antiguos del interior del túnel de la Pirámide del Sol consolidados con tres aditivos: cardón, nopal chamacuero y nejayote aplicados con tres métodos: aspersión, inyección y brocha

Aditivos	Dureza	Observaciones
1. Nejayote diluido a 10% en agua aplicado con aspersión	3.0	Aplanado de tierra consolidado con resistencia al rayado sin disgregación, forma una capa superficial gelatinosa ligeramente amarillenta
2. Chamacuero diluido a 10% en agua aplicado con aspersión	3.0	El aplanado conserva la apariencia original, consolidado resistente al rayado sin disgregación al tacto
3. Cardón diluido a 33% en aguamiel (cardón puro don diluir) aplicado con brocha	3.0	El aplanado de tierra antes del tratamiento registraba desplomes al tacto. Después presentó una apariencia de mojado, estable o consolidado al tacto resistente
4. Nejayote diluido a 10% en agua	2.0	La tonalidad del mortero en el resane es ligeramente amarillenta, se mantiene húmedo, compacto, gelatinoso, y bien integrado al aplanado antiguo
5. Ribete con mortero de tierra nejayote diluido 10% en agua	2.0	El mortero posee un tono ligeramente amarillento, húmedo, gelatinoso, compacto sin disgregación, con dureza resistente al rayado con un lápiz y bien integrado al aplanado antiguo
6. Cardón diluido 10% en agua aplicado con brocha	4.0	El aplanado antiguo de tierra se mantiene estable con apariencia de mojado, bien compacto, sin disgregación, con dureza resistente al rayado con un lápiz
7. Resane de mortero de tierra con cardón puro sin diluir	4.0	El resane y el aplanado antiguo tienen apariencia mojada, bien compactos, sin disgregación y dureza muy resistente al rayado

8. Ribete de mortero de tierra con cardón puro sin diluir	4.0	El mortero es de apariencia mojada, compacto y duro, resistente al rayado, sin disgregación, bien integrado al aplanado antiguo
9. Cardón puro sin diluir aplicado con brocha	4.0	El aplanado es de apariencia mojada, estable, compacto, duro, muy resistente al rayado sin disgregación
10. Cardón diluido 10% en agua aplicado con inyección	4.0	El aplanado tiene apariencia de mojado, estable, compacto, duro, dureza resistente al rayado con el lápiz, sin disgregación
11. Nejayote puro aplicado con aspersión	3.0	El aplanado ,con tono ligeramente amarillento, forma una capa gelatinosa en la superficie, compacta sin disgregación, dureza resistente al rayado con lápiz
12. Resane de mortero de tierra con nejayote puro sin diluir	3.0	El mortero del resane tiene apariencia amarillenta, gelatinoso, integrado al aplanado antiguo, estable al tacto, duro, resistente al tacto, sin disgregación
13. Ribete de mortero de tierra con nejayote puro sin diluir	3.0	El mortero con apariencia amarillenta, gelatinoso, estable, compacto, sin disgregación y dureza resistente al rayado con un lápiz
14. Chamacuero diluido 10% en agua aplicado por aspersión	3.0	El aplanado mantiene la apariencia original, estable, compacto, sin disgregación, dureza resistente al rayado con un lápiz, presenta sales en parte del área de aplicación
15. Resane de mortero de tierra con chamacuero	3.0	El mortero del resane está sin grietas, compacto, duro, sin disgregación, dureza resistente al rayado con lápiz
16. Ribete de mortero de tierra con chamacuero puro sin diluir	3.0	El mortero de los ribetes mantiene la apariencia original, se integra bien a los aplanados antiguos, es compacto y duro sin disgregación, dureza resistente al rayado con lápiz
17. Cardón diluido 10% en agua aplicado por aspersión	3.0	El aplanado antiguo mantiene la apariencia original, se presenta bien consolidado con resistencia al rayado con lápiz, sin disgregación
18. Resane de mortero de tierra con cardón sin diluir	3.0	Bien integrado al aplanado antiguo, compacto, duro, apariencia de mojado, dureza resistente al rayado con lápiz, sin disgregación de tierra
19. Ribete de mortero de tierra con cardón puro sin diluir	3.0	Los ribetes están fijos sobre el aplanado antiguo, estables, compactos, duros de apariencia mojada, dureza resistente al rayado con lápiz, sin disgregación de tierra

valente a la fluorita (se puede rayar con un cuchillo de acero sin disgregación de tierra) (véase la tabla 7).

Con base en los resultados obtenidos se puede inferir que dos de los mucflagos, cardón y nopal chamacuero, diluidos 10% en agua, y puro sin diluir, aplicados por aspersión, inyección y brocha, son los idóneos para la consolidación de aplanados antiguos y la elaboración de morteros de tierra para resanes y ribetes utilizados en condiciones extremas de hu-

medad. En este caso, no es aconsejable emplear el nejayote debido al cambio aparente de la tonalidad amarilla con una textura superficial gelatinosa.

Objetivo 9

Consolidar los adobes y el enlucido de tierra de tepojal en las escaleras de la plataforma oriente de la Caja de Agua, en Tlatelolco.



Figura 17. Plataforma oriente de la Caja de Agua. Fotografía: Moisés Rodríguez (2016).

Planteamiento del problema

Los adobes y enlucido observan graves problemas de disgregación al tacto, registrando un valor de dureza menor a 1, lo que significa que se desharían de sólo tocarlos.

Procedimiento

Para consolidar los adobes se seleccionaron y ubicaron sobre la escalera pequeñas áreas experimentales de aproximadamente 10 centímetros, para aplicar en ellas los tres mucílagos: cardón, nopal chamacuero y nejayote.

Se prepararon los mucílagos diluidos a 5 y 10% en agua: se aplicó la primera proporción con un aspersor manual en bandas alternas horizontales y verticales, repitiendo el procedimiento cuatro veces, seguido de la aplicación de la segunda proporción con las mismas fases. A continuación, se aplicó con brocha, en cuatro ocasiones, cardón puro diluido 33% en aguamiel, dejándolo secar para medir la dureza con los siguientes resultados.

Resultados

El adobe tratado con cardón diluido a 5 y 10% en agua, así como puro diluido 33% en aguamiel, incrementó los valores de dureza de -1 a 3 en la escala de Mohs, ello equivale a la calcita, que puede rayarse con una moneda de cobre, mientras que el acabado se presenta estable, firme y sin disgregación al tacto. Por otro lado, el adobe tratado con nopal chamacuero diluido en agua a 5% + 10% + puro (33% en agua),

aplicado con aspersión y con brocha, al igual que con el cardón incrementó el grado de dureza de -1 a 2 en la escala de Mohs, lo que equivale a que, como el yeso, se puede rayar con la uña y presenta disgregación de tierra. Por último, el adobe tratado con nejayote diluido a 5% + 10% + puro aplicado por aspersión y con brocha, de la misma manera que el cardón incrementó el grado de dureza de -1 a 3 en la escala de Mohs, ello equivale a que, como la calcita, se puede rayar con una moneda de cobre, y presenta una tonalidad amarilla con disgregación de tierra. En resumen, se vuelve a constatar que el nejayote no sirve para consolidar adobes, por lo tanto, debe descartarse.

Considerando los resultados registrados en los ensayos experimentales de cardón, con el visto bueno de la restauradora María del Carmen Castro y del arqueólogo Salvador Guilliem, se decidió consolidar los adobes de las escalinatas y del enlucido de la plataforma oriente de la Caja de Agua con cardón diluido en agua a 5 y 10%, así como puro diluido 33% en aguamiel, aplicados con aspersión y brocha, logrando incrementar el grado de dureza a 3 (equivalente a la calcita, que se puede rayar con una moneda de cobre), presentándose los enlucidos estables sin disgregación de tierra.

Discusión de resultados

De los tres aditivos naturales: cardón, nopal chamacuero y nejayote, ensayados para la consolidación de adobes, aplanados de tierra y sustitutos de agua para morteros de tierra, sólo con los dos primeros se obtuvieron resultados positivos. El nejayote puede emplearse para casos excepcionales donde el restaurador requiere de un mortero de tierra para aplanados de sacrificio sin disgregación e impermeable al agua de lluvia.

El cardón disuelto (puro) y sin diluir, así como el nopal chamacuero disuelto (puro sin diluir) sólo deben disolverse en agua, ya que, si se utiliza otro solvente, por ejemplo, el alcohol, se desnaturaliza. El cardón puro sin diluir envasado en bidones de plástico cerrados tiene una durabilidad de 2 a 3 meses

sin desnaturalizarse, siempre y cuando se mantenga en lugares frescos bajo techumbre. Incluso se puede mantener en refrigerador por hasta un año, pero antes de usarse debe agitarse o removerse el solvente. El nopal chamacuero sólo tiene una duración de un mes, aun cuando se le mantenga en el refrigerador.

La consolidación de los aplanados y adobes de tierra depende del uso correcto del cardón o del nopal chamacuero; según el criterio del restaurador, los adobes y aplanados quedan muy duros con el primero de los solventes, llegando a incrementar el grado de dureza de 4 a 5, mientras que con el segundo sólo llega a grado 3 en el índice de dureza en la escala de Mohs. La aplicación de alguno de los dos elementos, según sea el caso, debe ser estrictamente sistemática en cada uno de los pasos, sin dejar secar la superficie de los adobes o aplanados de tierra: 1) diluido a 5% en agua y aplicado con aspersion en cuatro bandas alternas, 2 horizontales y 2 verticales, sin superponerlas, baja concentración que permite una mayor penetración; 2) diluido a 10% en agua con el mismo procedimiento para fijar la arcilla, y 3) puro sin diluir aplicado con brocha y cerdas de ixtle para la consolidación de la arcilla, aplicando el mismo procedimiento y los porcentajes anteriores, sin remoción superficial ni adherencia de la arcilla en las cerdas de la brocha. El proceso de secado de la tierra consolidada ocurre de tres a cinco días.

Conclusiones

En las zonas arqueológicas de Teotihuacán, Tlatelolco y Tula, los adobes y aplanados de tierra, en condiciones extremas de humedad y resequedad, registraban graves problemas, al grado extremo de disgregarse con el tacto. Los solventes disueltos a 10% en agua, aplicados con aspersion, y puros sin diluir aplicados con brocha, consolidaron muy bien la tierra, mantuvieron la apariencia original, estabilizaron forma y volumen *in situ* y se les podía tocar y manipular para algún tipo de estudio.

El nejayote consolida los adobes pero no los aplanados de tierra, ya que les altera la apariencia origi-

nal, forma una capa superficial gelatinosa, y provoca contracciones, rompimientos y desprendimiento de arcilla al secado, razón por la cual no sirve.

Los resultados de los ensayos experimentales de consolidación de adobes en laboratorio y campo (zonas arqueológicas de Teotihuacán y Tula) son muy similares, constatándose que sólo el cardón y el nopal chamacuero funcionan para consolidar adobes, mientras que el nejayote se descarta por afectar la apariencia e incrementar la disgregación de tierra en los adobes.

En grupos de muestras de aplanados finos preparados con mortero de cal hidratada en 3 proporciones: 7.1.1 (barro suave + arena de tezontle negro de grano medio lavada), mezclada la primera con cardón a 10%, la segunda con nopal chamacuero a 10% y la tercera con nejayote a 10% también.

Los resultados obtenidos presentan diferencias significativas, por ejemplo: las muestras testigo mezcladas con agua carecen de adhesividad y se observa 2.0 grados de dureza, 1 segundo de higroscopicidad (el tiempo que tarda el aplanado en absorber la gota de agua) y una disgregación instantánea del mortero. Resalta que los morteros con cal hidratada + cardón diluido a 10% son muy adherentes o pegajosos, tienen una dureza de 2 a 5 grados, pero son poco permeables, pues tarda en absorber el agua de 6 a 7 segundos, sin disgregar el material. Los morteros con cal hidratada mezclados con nopal chamacuero disuelto a 10% son ligeramente adherentes, pero registran un incremento en el grado de dureza de 2 a 3, son permeables ya que tardan en absorber agua de 4 a 5 segundos, con una ligera disgregación de tierra. Los morteros con cal de hidratada + nejayote diluido a 10% no registran adherencia, incrementan el grado de dureza de 2 a 3, son impermeables al agua y no provocan disgregación de tierra.

Se ha podido comprobar que la sustitución del agua por mucílagos de cardón y nejayote en los aplanados finos de tierra es buena alternativa de mantenimiento para incrementar la dureza, prolongar la durabilidad y evitar la disgregación de la tierra, manteniéndose las opciones para elegir un mortero permeable o impermeable según lo requiera la con-

servación en acabados arquitectónicos de tierra. Los resultados de los ensayos experimentales en laboratorio y campo con la sustitución del agua por aditivos puros en morteros de tierra en aplanados finos de barro suave en proporciones 7 (barro suave de grano medio), 1 (arena de tezontle de grano medio lavada) y 1 (cal de piedra apagada) + cardón, nopal chamacuerdo y nejayote puros incrementaron el grado de dureza de 2 a 4 en cardón permeable al agua sin disgregación de tierra, en nopal chamacuerdo permeable al agua con disgregación de tierra y en nejayote con grado de dureza de 2 a 3 impermeable sin disgregación de tierra. En este caso, el nopal chamacuerdo no funciona en aplanados finos de tierra, pero permite las opciones para elaborar un aplanado permeable o impermeable al agua de lluvia, según sea el caso en la conservación de acabados arquitectónicos de tierra.

Los aplanados de tierra en el interior del túnel, bajo condiciones extremas por una humedad superior a 80%, quedan bien consolidados al aplicarse cardón y nopal chamacuerdo diluidos a 10% en agua con aspersión y puros aplicados con brocha, sin formar una capa en superficie, manteniendo la apariencia original estable y compacta, sin disgregación de tierra, incrementando el grado de dureza de 3 a 4, equivalente a la calcita y la fluorita, que sólo se pueden rayar con una moneda de cobre y un cuchillo de acero la segunda.

Del cardón, nopal chamacuerdo y nejayote ensayados con morteros de tierra en aplanados finos con barro suave, requeridos para resanes y ribetes en los aplanados antiguos de tierra, sólo los dos primeros funcionaron bien, están fijos e integrados, compactos, duros, resistentes al rayado sin disgregación de tierra.

En la Caja de Agua, en Tlatelolco, de los tres aditivos probados (cardón, nopal chamacuerdo y nejayote) para consolidar adobes y enlucido de la plataforma oriente, sólo el cardón diluido a 5 y 10% en agua aplicado con aspersión y puro con brocha, consolidó los dos materiales con incremento en grado de dureza de -1 a 4 (fluorita), que puede rayarse únicamente con un cuchillo de acero.

Bibliografía

- Biblioteca Digital de la Medicina Tradicional Mexicana (2009), Programa Universitario México, Nación Multicultural y Dirección General de Servicios de Cómputo Académico-UNAM/Fundación Landsteiner Scientific.
- BRAVO-HOLLIS, Helia (1978), *Las cactáceas de México*, México, UNAM.
- CALDERÓN DE RZEDOWSKI, Graciela, y Jerzy RZEDOWSKI (1985), *Flora fanerogámica del valle de México*, vol. II, México, Instituto de Ecología/Escuela Nacional de Ciencias Biológicas-IPN.
- CARVAJAL-MILLÁN, E., A. RASCÓN-CHU, y J. A. MÁRQUEZ-ESCALANTE (2005), “Método para la obtención de goma de maíz a partir del líquido residual de la nixtamalización del grano del maíz, Mexican Patent PA/a2005/008124.
- _____, A. RASCÓN-CHU, A., J. A. MÁRQUEZ-ESCALANTE, N. PONCE DE LEÓN, V. MICARD, y A. GARDEA (2007), “Maize bran gum: Extraction, characterization and functional properties”, *Carbohydrate Polymers*, vol. 69, núm. 2, pp. 280-285.
- NIÑO-MEDINA, G., E. CARVAJAL-MILLÁN, A. GARDEA-BEJAR, A. RASCÓN-CHU, y J. A. MÁRQUEZ-ESCALANTE (2007), “Caracterización composicional fisicoquímica y funcional de una goma de maíz recuperada del nejayote”, XVIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
- MUNSELL COLOR COMPANY (2013). *Munsell Soil Color Charts*, Baltimore.
- RAMÍREZ RODRÍGUEZ, Rodolfo (2004), “El maguey y el pulque: memorias y tradición convertidas en historia, 1884-1993”, tesis de licenciatura, BUAP, Puebla.
- TORRES SORIA, P., y Luciano CEDILLO ÁLVAREZ (1998: 35-41). “La goma del nopal: una aportación para la conservación de arquitectura de tierra seca protegida por la techumbre”, *Antropología. Boletín Oficial del Instituto Nacional de Antropología e Historia*, núm. 51, pp. 35-41.
- _____, S. CRUZ FLORES, N. C. PEÑA PELÁEZ, S. E. FERNÁNDEZ MENDIOLA, M. A. RODRÍGUEZ IBARRA, y A. CRUZ BECERRIL (2015) “La baba y el mucílago de nopal, una alternativa natural para la conservación de acabados arquitectónicos de tierra”, *Antropología. Boletín Oficial del Instituto Nacional de Antropología e Historia*, núm. 99, pp. 91-100.