

María de los Ángeles Vizcarra de los Reyes

***Lessons for relearning traditional know-how:
Rammed earth walls of Tepeyahualco region, in
Mexico***

*Lecciones para la recuperación de saberes
tradicionales: Las tapias de la región de
Tepeyahualco, México*

*Lições para a recuperação do conhecimento
tradicional: As taipas da região de
Tepeyahualco, México*

Keywords | Palabras clave | Palavras chave

Traditional architecture, Traditional construction, Rammed earth, Pozzolans, Puebla

Arquitectura tradicional, Construcción tradicional, Tierra compactada, Pozolanas, Puebla

Arquitectura tradicional, Construção tradicional, Terra compactada, Pozolanas, Puebla

Abstract | Resumen | Resumo

The prime objective of this article is to analyze a particular method of building rammed earth walls used in Tepeyahualco, Mexico, using pozzolana, earth, and lime waste. It also aims to show how such building know-how has been adapted to its sociocultural context, as in this system stemming from the combination of the two older construction techniques: rammed earth walls, and roofs made of lime and pozzolans. The research involved on-site documentation of the rammed earth walls and all other building techniques related to them. Apart from interviews with local builders familiar with the technique, a systematic study of it was carried out. Laboratory tests were subsequently performed to verify inferences made on the site. The results lay bare how traditional building methods can well continue to evolve from their particular cultural contexts, and even contribute to the development of new technical applications that take that traditional knowledge as a starting point, especially in the quest for more sustainability.

El primer objetivo de este artículo es analizar un sistema constructivo de tapia particular que se emplea en Tepeyahualco, México. Este tipo de tapia está conformado por pozolanas, tierra y residuos de cal. Otro de los fines de la investigación es mostrar cómo estos saberes constructivos se han adaptado a su contexto sociocultural, tal como sucede con este sistema, que se ha generado a partir de la combinación de dos técnicas constructivas más antiguas: las tapias de tierra y los terrados de cal y pozolanas. El trabajo se desarrolló mediante la documentación *in situ* tanto de las tapias como de otros sistemas constructivos relacionados con ellas. Además de entrevistas a maestros constructores de la localidad que conocen la técnica, se realizó un estudio sistemático del fenómeno constructivo. Posteriormente se realizaron pruebas de laboratorio para verificar los supuestos inferidos en campo. Los resultados muestran que es posible que los saberes

constructivos tradicionales continúen evolucionando desde sus propios contextos culturales, y que además pueden aportar conocimientos para el desarrollo de aplicaciones técnicas novedosas que tomen como punto de partida esos conocimientos tradicionales, especialmente en busca de una mayor sostenibilidad.

O primeiro objectivo deste artigo é analisar um sistema construtivo de taipa em particular que se emprega em Tepeyahualco, México. Este tipo de taipa está formado por pozolanas, terra e resíduos de cal. Outra das finalidades da investigação é demonstrar como estes conhecimentos construtivos foram adaptados ao seu contexto sociocultural, tal como acontece com este sistema, que foi criado a partir da combinação das duas técnicas construtivas mais antigas: as taipas de terra e os terraços de cal e pozolana. O trabalho desenvolveu-se mediante a documentação *in situ*, tanto de taipas como de outros sistemas construtivos relacionados com as mesmas. Para além de entrevistas a mestres construtores da localidade que conhecem a técnica, realizou-se um estudo sistemático do fenómeno construtivo. Posteriormente, realizaram-se ensaios de laboratório para verificar as hipóteses inferidas no campo. Os resultados mostram que é possível que o conhecimento construtivo tradicional continue a evoluir desde os próprios contextos culturais e que também podem proporcionar conhecimento para o desenvolvimento de aplicações técnicas inovadoras que partem desses conhecimentos tradicional, especialmente na procura de mais sustentabilidade.

Introducción

El tema central de este trabajo es el análisis de las tapias de la región de Tepeyahualco, en el estado de Puebla, en México, donde se encontró una variante muy interesante del tapial de tierra cruda. Esta técnica conserva el mismo procedimiento constructivo que las tapias de tierra, pero modifica su composición: el barro ha sido complementado, y en algunos casos sustituido, por una mezcla de rocas volcánicas y residuos de cal. Esta mezcla era empleada originalmente en los terrados de cubiertas y entrepisos de las edificaciones de la región. Este hecho, aunado a la continuidad en el uso del encofrado para hacer el muro, permite afirmar que este tipo de tapia es producto de la evolución de las arquitecturas tradicionales de

Tepeyahualco, y que, a diferencia de lo que se observa en la actualidad en la mayoría de las tradiciones constructivas de México, esta técnica ha encontrado la manera de transformarse dentro de su propio contexto cultural, sin que exista riesgo de que desaparezca. Con esta técnica se edifican muros de un espesor casi un 50% menor al de las tapias de tierra que se construyen en la misma región, de entre 25 y 30 centímetros, frente los. entre 60 y 80 centímetros de las tapias de tierra. Al mismo tiempo, esta técnica permite seguir utilizando materiales locales, conserva la sencillez del proceso de ejecución y, como sus predecesoras, no requiere herramientas sofisticadas. Otro factor relevante para este análisis es la originalidad del sistema, pues no se tiene registro de un proceso constructivo similar en México (Fig. 1).

Figura 1. Tapias de la antigua hacienda Pizarro, Tepeyahualco, Puebla (Acervo del Laboratorio de procedimientos y sistemas constructivos tradicionales, Facultad de Arquitectura, UNAM (LABPySCT), Diego Valadez Sáenz, diciembre de 2014)



Marco conceptual y metodología

Con frecuencia se sostiene que una de las cualidades de la arquitectura tradicional es su adaptabilidad frente a los cambios. Sin embargo, las observaciones llevadas a cabo en campo en diversas investigaciones desarrolladas en la Facultad de Arquitectura de la UNAM, permiten constatar que la arquitectura vernácula está transformándose en ocasiones de maneras poco afortunadas, que conllevan la pérdida de los conocimientos propios de esta arquitectura. Si el tapial de piedra pómez y residuos de cal de Tepeyahualco ha surgido de otros sistemas constructivos tradicionales de la misma región, y si se confirman los factores a partir de los cuales se infiere esta transformación, como el uso de materiales disponibles en la localidad, su derivación de otros sistemas constructivos del propio contexto cultural, la transmisión de saberes y habilidades de generación en generación, su adaptabilidad a las condiciones económicas y a la transformación en los modos de vida, y finalmente, su durabilidad y poco mantenimiento; entonces es factible, a partir de esta información, generar parámetros de identificación de variables evolutivas que puedan aplicarse a otras tradiciones constructivas del país para provocar procesos que contribuyan su preservación y para propiciar su actualización dentro de sus propios contextos socioculturales.

Esta investigación se llevó a cabo mediante el estudio de las condiciones históricas, socioculturales y ambientales de la región donde se desarrolló este sistema constructivo. Posteriormente se caracterizó la tapia desde estas perspectivas, además de sus aspectos técnicos, mediante trabajo de campo, que incluyó levantamientos, entrevistas y recolección de materiales para su posterior análisis en laboratorio; y mediante trabajo de gabinete, que permitió corroborar las hipótesis planteadas al inicio del trabajo. Esta información fue sintetizada y correlacionada mediante un enfoque sistémico (Capra 2014), lo que permitió generar parámetros de identificación del proceso de transformación de la tapia en estudio para aplicarlos en otras tradiciones constructivas que tengan características similares. Se buscaba con ello encontrar factores que pudieran ayudar a detonar los propios procesos evolutivos de esas

Figura 2., Localización de Tepeyahualco (Acervo del LABPySCT, Diego Andrés García Ruiz, septiembre de 2016)



otras tradiciones constructivas, y finalmente identificar posibles aportaciones de este fenómeno de estudio que puedan abonar a la praxis arquitectónica contemporánea en el campo de la sostenibilidad en términos técnicos, ambientales, económicos, sociales y culturales.

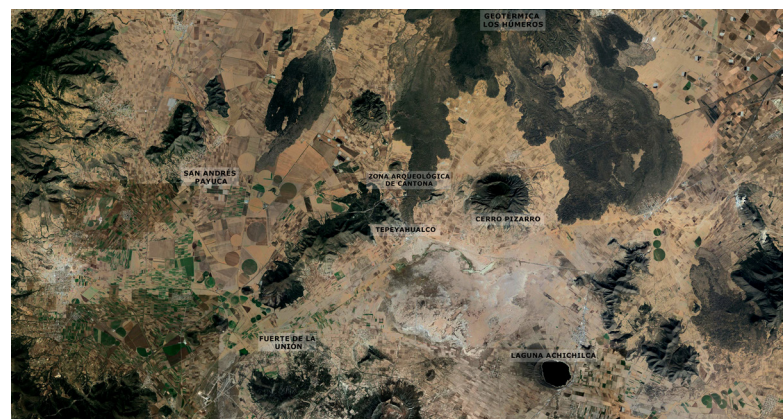
Tradición constructiva en Tepeyahualco

El significado de la palabra Tepeyahualco se relaciona con el antiguo nombre de raíces nahuas *Tepeyaguhualua*, que significa “en la redondez de los cerros”, y deriva de las voces *tepetl*, “cerro”, y *yaguhualua*, “cosa redonda” (Cervantes 2014). El poblado se localiza en la zona noreste del Estado de Puebla, en la cuenca de El Seco, donde se ubicaba la gran ciudad mesoamericana que hoy se conoce como Cantona, que estuvo asentada sobre un área volcánica y que en su época de mayor esplendor, hacia el año 1050 d.C., tuvo cerca de 90,000 habitantes (García Cook 2014) (Fig. 2 y 3).

La fundación formal de Tepeyahualco tal como se conoce hoy data de 1566, por cédula real del virrey Gastón de Peralta. La localidad vivió tiempos de auge económico debido a su estratégica ubicación al borde del Camino Real, ruta que comunicaba la Ciudad de México con el Puerto de Veracruz, entonces única salida y enlace con España (Cervantes 2014). Este camino fue consolidado a partir de las rutas ya establecidas por las culturas mesoamericanas de las provincias tributarias del Golfo de México, que comunicaban con la gran ciudad de México-Tenochtitlan, hoy Ciudad de México (Muñoz 2006). Así, en la región se inició la construcción de ventas, postas y mesones donde se ofrecían alimentos y hospedaje. Comenzó con ello la tradición constructiva de Tepeyahualco, donde se desarrollaron las diversas técnicas que se describen a continuación.

Estos sistemas constructivos han sido y son, al igual que la gran mayoría de las tradiciones constructivas del

Figura 3. Mapa de la región, donde se aprecian las poblaciones de Tepeyahualco, El Fuerte de la Unión, la ciudad prehispánica de Cantona y otros puntos de interés. Al norte destaca el área volcánica que dio origen a los materiales empleados en las tapias analizadas (Google Earth 2019, editada por Karen Aimeé Mendoza)



mundo, producto de los recursos naturales, el clima y las condiciones físicas del lugar, así como de la cultura tanto de los pueblos mesoamericanos como de los españoles. Estas técnicas son, fundamentalmente, la piedra apilada, la piedra cementada con cal, las tapias de tierra y los terrados de cal y piedra pómez para las cubiertas.

La piedra apilada, conocida en España y otras regiones como fábrica de piedra en seco o de junta seca, ya presente en la ciudad mesoamericana de Cantona, se caracteriza por la ausencia de cementantes o aglutinantes. Las rocas volcánicas locales se colocan en talud y paramento, buscando la inclinación adecuada para que las piedras no se deslicen, además de estar trabadas entre sí mediante cantos de menor tamaño (Fig. 4).

Otro sistema utilizado en la región es la piedra combinada con cal, que aparece en tiempos de la colonia, cuando fue empleada principalmente en arquitectura de gran escala, como en la iglesias, las casonas y posteriormente en las haciendas. Las rocas usadas son calizas, basalto y granito, unidas con morteros de cal y recubiertas en su mayoría con una capa de piedras volcánicas, ya sea piedra pómez, *tepojal* o *tezontle*, y cal. Se infiere que este mortero se utilizaba para emparejar la piedra no labrada, además de otorgar mayor protección contra las inclemencias climáticas (fuertes heladas y salinidad de los suelos). La cal era y es todavía extraída de las canteras que existen alrededor y era fabricada en hornos de leña. A principios del siglo pasado se construyó una calera que ya procesa el material con métodos industrializados, y de esta producción se obtiene el residuo de cal que se emplea actualmente en las tapias estudiadas.

Agustín Cervantes, cronista de Tepeyahualco, afirma que “desde la conquista se hacían encofrados rellenos con piedra maciza volcánica, del malpaís”¹. Así, durante el

periodo colonial se construyeron este tipo de muros a la manera de las tapias de cal y canto provenientes de España, también llamadas mamposterías encofradas. Llama la atención la mezcla de piedras utilizadas, lo que indica que efectivamente se trataba de encofrados, aunque no quede huella de la unión entre cajones debido al recubrimiento de pómez y cal. El descuido en el careo, la disposición irregular y la forma de los cantos son indicios claros de ello (Fig. 5).

El tapial de tierra es uno de los sistemas constructivos que anteceden directamente a las tapias analizadas. Como es sabido, la tierra apisonada, comprimida o compactada, es una unidad monolítica construida a partir de tierra previamente seleccionada y que es vertida dentro de un encofrado, el cual es rigidizado con el fin de no deformar la tapia durante el apisonado de las capas de tierra. Se compacta cada estrato en capas de 15 a 20 centímetros con un pisón de madera o metálico hasta llenar el encofrado y así conformar la tapia. Este muro se caracteriza por su forma rectangular, con un espesor que oscila entre los 40 y los 80 centímetros, dependiendo de las características de cada edificación, como son las alturas y los huecos. Los métodos, las técnicas y las herramientas para hacer tapias se han transformado a lo largo del tiempo, pero siempre basados en el mismo principio: compactar un material disperso para que alcance una cohesión mayor y en consecuencia, mayor estabilidad.

La consolidación de esta práctica constructiva en México se produjo tras la llegada de los españoles, mediante la fusión de las técnicas constructivas de tierra del continente americano, como la tierra vertida y la tierra colada, con las europeas. Durante el periodo colonial las tapias fueron utilizadas para la construcción de distintos edificios, como bardas, viviendas, templos y haciendas, así como en infraestructuras viales e hidráulicas, comúnmente en combinación con otras técnicas y sistemas constructivos.

Figura 4. Talud en muros de Cantona, Puebla (María de los Ángeles Vizcarra)



Figura 5. Construcción con piedra con revestimientos de cal y rocas volcánicas, Tepeyahualco, Puebla (Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)





Figura 6. Muro tradicional de tapia en San Andrés Payuca, Puebla

Figura 7. Arquitectura vernácula hecha con tapias de tierra en el estado de Puebla

Figura 8. Techumbre en ruinas donde se distingue el sistema constructivo de las cubiertas: vigas de madera con tejamanil y terrado de piedras volcánicas con cal, Tepeyahualco, Puebla. Se aprecia también la resistencia de la mezcla, ya que se sostiene aun sin el apoyo de las vigas y el tejamanil

(Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)

Dentro de la evolución de la tapia en México es también importante destacar la influencia arquitectónica y tecnológica francesa a finales del siglo XIX (Guerrero 2011) (Fig. 6).

La trascendencia de la tapia también se vio reflejada en la vivienda popular, ya que esta técnica fue incorporada a la vida cotidiana y se convirtió en una forma tradicional local de construir, debido a la disponibilidad del material prácticamente en cualquier sitio, y a la ventaja de requerir muy poca agua para su manufactura, además de la posibilidad de reutilizar los tapias. Así, las tapias adquirieron una gran presencia dentro de la arquitectura vernácula en México y se incorporaron a la memoria y la tradición constructiva de la zona (Fig. 7).

Los terrados de piedra pómez con cal, también antecedente directo de las tapias de Tepeyahualco, fueron desarrollados para cubrir techumbres que son en su mayoría planas, por

la poca cantidad de lluvia que se registra en la región. La estructura portante es de viguería de madera y soporta un entramado ligero de tablas, conocidas en México como tejamanil, colocadas de forma transversal o diagonal sobre la viguería. Sobre este entramado se disponen los terrados, contruidos con una mezcla de piedras volcánicas cuyas características son explicadas más adelante y que incluye piedra pómez, *tepojal* o *tezontle* y cal, en lugar de las capas de tierra compactada usadas en otras regiones para este tipo de cubiertas. La cal y las piedras volcánicas forman una reacción puzolánica² que forma un material similar a un hormigón pobre llamado hormigón ciclópeo o romano. Esta mezcla representa ventajas frente a los terrados de tierra compactada, pues requiere menos mantenimiento, las cargas de la cubierta son más ligeras, y además no requiere agregar capas de material periódicamente, como en el caso de la tierra compactada, que va desgastándose con el tiempo (Fig. 8).



9a



10



9b

Figura 9 a y b. Tapias de piedra poma y cal de reciente construcción, Tepeyahualco, Puebla (Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)

Figura 10. Barda de 50 metros, construida con tapias de piedra poma y cal, El Fuerte de la Unión, Tepeyahualco, Puebla (Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)

Las tapias de Tepeyahualco

Estas tapias aquí analizadas son de origen relativamente reciente. Según datos encontrados en campo, surgen a principios del siglo XX tanto en Tepeyahualco como en la localidad aledaña del El Fuerte de la Unión para satisfacer una demanda rápida y eficaz de construcción popular durante la revolución mexicana, que dio lugar a la fundación misma de la localidad de El Fuerte, ya que en ella originalmente se asentó un campamento militar (Fig. 9).

La investigación de campo consistió en documentar y registrar el sistema constructivo y sus procedimientos mediante fotografías, levantamientos y recopilación de muestras de los materiales empleados; así como en entrevistar a dos maestros constructores del lugar que dominan esta técnica. Don Agustín Cervantes y Don Guadalupe Reyes narraron con detalle el procedimiento, que fue videograbado³, además de reproducir el sistema constructivo mediante la construcción de una tapia en tamaño real (2,10 metros x 1,10 metros x 0,25 metros). A través de estas entrevistas fue posible documentar con precisión el proceso y las experiencias derivadas de la colectividad, fundamentales para la comprensión del sistema.

Respecto a la tipología arquitectónica construida con este sistema en la región, se encontraron viviendas bastante precarias, la mayoría de una sola habitación, con techumbre de morillos de madera y un terrado de la misma mezcla usada en la tapia, y sobre todo bardas para la delimitación de predios. Aquí cabe señalar que se encontraron bardas de hasta 50 metros de largo por 3 metros de alto sin refuerzos intermedios, lo que es por sí mismo buena muestra de la

resistencia del sistema y da un indicio del potencial que puede tener para otros usos (Fig. 10).

Caracterización de los materiales

Los materiales que incorpora esta técnica proceden tanto del entorno natural del sitio como de los desechos de la industria calera que se ubica en Tepeyahualco.

La tierra ha sido complementada, y en algunos casos sustituida, por una mezcla de residuos de cal llamada “excedente de cal”, y tres tipos de materiales rocosos triturados, de origen volcánico. El primero y el más utilizado es la pumita, pumicita o piedra pómez, conocida localmente como “piedra poma”. El segundo material es una roca ígnea intrusiva llamada *tezontle*, que es una espuma de lava petrificada de color negro o rojizo, más denso y menos ligero que la pumita. La palabra proviene del náhuatl *tetzontli*, donde *tetl* significa “piedra”, y *tzontli*, “mechón de cabellos” o “manejo de hierba”. El tercer material es un tipo de piedra con una composición química muy similar a la pumita, pero por efectos ambientales presenta una estructura cristalina discontinua, de mayor porosidad, que la hace aún más ligera, y que contiene también arcillas, llamada en México *tepojal* o *tepezil*, y en la localidad, *cacahuatillo* (Fig. 11).

El componente esencial del sistema lo constituye el residuo del proceso de fabricación de cal aérea. Este material se compone principalmente de arenas procedentes de la roca caliza que no alcanzó a calcinarse en el proceso de obtención de la cal⁴; y que, sin embargo, se ha visto térmicamente alterado, con lo que ha adquirido propiedades ligeramente aglutinantes por carbonatación, ya que contiene fracciones



Figura 11. Materiales que componen las tapias, Tepeyahualco, Puebla: a. Piedra “poma”; b. Tezontle; c. Cacahuatillo; d. “Barro renegrido” (Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)

de material calizo que sí alcanzaron la temperatura necesaria para convertirse en óxido de calcio, con lo que poseen propiedades reactivas. Otro factor que contribuye a conferir propiedades aglutinantes a este material es la reacción puzolánica que se lleva a cabo entre estas fracciones de óxido e hidróxido de calcio y los agregados de origen volcánico que contiene. Se calculó mediante pruebas empíricas en campo y en laboratorio que esta mezcla de residuos de cal tiene aproximadamente un 85% de partículas inertes (arenas de roca caliza triturada) y un 15% de óxido e hidróxido de calcio (Fig. 12).

Finalmente, en la mezcla estudiada se utiliza también tierra de alto contenido limoso llamada en la localidad “barro renegrido”, por su color oscuro.

Tanto los materiales volcánicos como la tierra son de fácil extracción y transformación manual, y los bancos de materiales se encuentran en un radio de cinco kilómetros del poblado de Tepeyahualco. El excedente de cal representa el factor clave en la fabricación de las tapias de “poma”. Fue a partir de la fundación de la calera y por tanto del inicio de la producción de este residuo cuando se intensificó el desarrollo y uso de este tipo de tapias, ya que se contaba con abundante material para su fabricación y presentaba mejor resistencia a la compresión y mejor respuesta ante los agentes erosivos que las tapias de tierra.

Además de la reacción química entre la cal y los materiales volcánicos, que explica en gran medida la dureza de

Figura 12. Excedente de cal, Tepeyahualco, Puebla: vista del residuo en la calera y en el sitio de trabajo. En la última imagen, los puntos blancos que se observan son las partículas de óxido e hidróxido de calcio presentes en el remanente (Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)





Figura 13. Detalle de la granulometría de los componentes de la mezcla de la tapia, Tepeyahualco, Puebla (Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)

estas tapias, existe una amplia gama granulométrica en la combinación de materiales resultante, lo que permite una óptima densificación durante el compactado. La piedra pómez y el tepojal se agregan en partículas de muy diferentes tamaños que, por la geometría irregular de sus caras y aristas, se traban bien entre ellas. La fricción entre los distintos componentes de la mezcla, sumada a la densificación que conlleva la presencia de arenas finas en el excedente de cal y su capacidad para rellenar los huecos entre las piedras, el aglutinamiento de la arcilla presente en la tierra y el proceso de puzolanización confieren al sistema notables cualidades resistentes (Fig. 13).

Variantes según la mezcla de materiales

En la investigación de campo se encontraron cuatro variantes de la mezcla empleada para estas tapias. La primera y más popular incluye piedra pómez, cacahuatillo, residuos de cal y "barro renegrido", con proporciones uno a uno entre los materiales volcánicos y la cal, y un tercio de volumen de barro (mezcla T-1). En la segunda variante se sustituye la piedra pómez por tezontle en las mismas proporciones (mezcla T-2). En la tercera, se omite el barro y se conservan igualmente las proporciones uno a uno de los materiales volcánicos y el residuo de cal (mezcla T-3). Finalmente, en la cuarta variante, los residuos de material calizo son sustituidos por hidróxido de calcio comercial y

Figura 15. Encofrado de madera utilizado en la actualidad, Tepeyahualco, Puebla (Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)



Mezcla				
Material en volumen	T-1	T-2	T-3	T-4
Residuo de cal	1	1	1	-
Cal aérea	-	-	-	1/6
Arena	-	-	-	5/6
Piedra Pómez	1	-	1	1
Cacahuatillo	1	1	1	1
Tezontle	-	1	-	-
Barro renegrido	1/3	1/3	-	-

Figura 14. Tabla de dosificación de las mezclas

arena de río, en una proporción aproximada de un 5% de cal aérea y un 30% de arena respecto al volumen total de la mezcla (mezcla T-4) (Fig. 14).

Estas variantes tienen implicaciones en las cualidades estructurales del sistema constructivo, particularmente en la resistencia a la compresión, que serán analizadas más adelante.

Procedimiento constructivo

Los primeros encofrados de estas tapias estaban fabricados en su totalidad con madera, y se utilizaban sogas para rigidizarlos. El que actualmente se emplea ha incorporado algunas piezas metálicas y se compone de los siguientes elementos: dos tableros y dos tapas hechas de contrachapado o tablones; los polines de madera o morillos que mantienen el molde en su posición; y los bastones hechos de varilla rosca de 3/8 de pulgada que mantienen unido el encofrado para evitar las deformaciones durante el apisonado. Las dimensiones del molde son normalmente

Figura 16. Materiales mezclados: en seco y ya con el grado exacto de humedad, Tepeyahualco, Puebla (Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)





Figura 17. Proceso constructivo: apisonado, Tepeyahualco, Puebla (Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)

de 2 metros de largo por 1 metro de alto y el espesor ronda los 25 centímetros (Fig. 15).

Los pisones son de madera o de metal. Para revolver la mezcla se utilizan el pico y la pala y para verterla en el encofrado, una pala y un cubo.

Para hacer la cimentación se cava una zanja de entre 50 centímetros y 1 metro de profundidad, hasta encontrar suelo firme, y con un ancho de 50 centímetros para poder maniobrar dentro de ella. Dentro de ella se arma el molde. Una vez listo, se hace la mezcla en seco de los materiales con las proporciones descritas en el apartado anterior; y, una vez mezclados, se agrega agua hasta obtener una consistencia húmeda. Según la descripción de los propios maestros constructores: “se trata de usar la menor cantidad de agua, la suficiente para que quede una mezcla homogénea, pero que no quede con mucha agua, de forma que, al tomar una porción de la mezcla en las manos y apretarla, no escurra agua, pero queden los materiales cohesionados”⁵ (Fig. 16).

La “piedra poma” y el *cacahuatillo* son de diferentes tamaños para que el bloque tenga mayor consistencia. La

Figura 19. Probetas de ensayo después de haber sido sometidas a las pruebas de compresión en los Laboratorios de enseñanza e investigación de la edificación sustentable de la Facultad de Arquitectura de la UNAM (Acervo del LABPySCT, Karina Silva Montecillo)

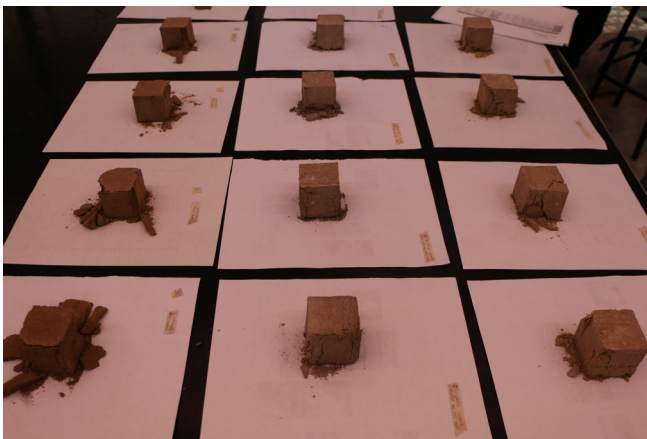
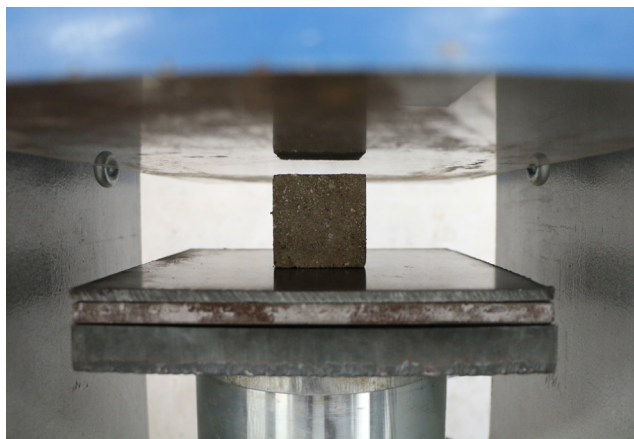


Figura 18. Proceso constructivo: descimbrado y tapia terminada, Tepeyahualco, Puebla (Acervo del LABPySCT, María de los Ángeles Vizcarra)

“poma” llega a medir hasta 15 centímetros, mientras que el *cacahuatillo* suele ser de alrededor de 5 centímetros. En cuanto al excedente de cal, es necesario eliminar la capa superficial que ha estado en contacto con el aire, pues ésta, ya endurecida, puede haber fraguado previamente en presencia de aire si ha habido suficiente humedad para ello.

Una vez hecha la mezcla, se humedecen tanto el terreno como el encofrado para que no absorban la humedad de la mezcla al verter la argamasa. Ésta se deposita en capas de entre 15 y 20 centímetros de espesor, compactando cada estrato a medida que es vertido y teniendo especial cuidado en la compactación de las esquinas. Una vez lleno el cajón, se retira la cimbra y se coloca nuevamente a una cierta distancia, dejando un espacio del tamaño de una tapia para dar tiempo a que seque el primer bloque realizado. Una vez que el bloque ha adquirido dureza mediante el secado, puede hacerse la tapia adyacente. Al igual que en las tapias de tierra, es necesario contrapear los módulos que conforman las sucesivas hiladas horizontales para asegurar el correcto funcionamiento estructural del conjunto (Fig. 17 y 18).

Figura 20. Prensa manual ELVEC con una de las probetas a ensayar en el Laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco (Acervo del LABPySCT, Diego Andrés García Ruiz)



Trabajo de laboratorio

Una vez concluido el trabajo de campo, se llevó a cabo un proceso experimental en laboratorio a partir de las inferencias de los estudios realizados, las entrevistas y la comprensión de las interacciones mecánicas y físico-químicas de los materiales que componen el sistema constructivo. Los experimentos tuvieron como objetivo la identificación de sus posibles aportaciones en el campo de la sostenibilidad en términos técnicos, así como evaluar la resistencia mecánica de las distintas mezclas a la compresión y verificar la presencia de reacciones puzolánicas en el fraguado. Para ello, se aplicó el siguiente método de análisis empírico-experimental:

1. Se caracterizaron los materiales que componen las mezclas con el fin de comprender su función dentro del sistema. Para la tierra se definieron los límites líquido, plástico y de contracción mediante la prueba de los límites de Atterberg, además del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS, ASTM D2487-11, 2011). Para las rocas volcánicas y sus interacciones con la cal se utilizaron como referencia las normas NMX-C-508-ONNCCE-2015⁶, NMX-C-513-ONNCCE-2015⁷ y NMX-C-003-ONNCCE-2015⁸. Para las pruebas de compresión simple se tomó como referencia tanto la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013⁹, como la ASTM C39-2018¹⁰.

2. Ya que se infiere que el hidróxido de calcio desarrolla por un lado reacciones puzolánicas y por otro endurece por carbonatación, y que ambos procesos tienen distintas velocidades de reacción (Guerrero *et al.* 2014), se determinó realizar juegos de seis probetas cúbicas de 5 x 5 x 5 centímetros por mezcla, con distintos periodos de fraguado. Se establecieron tres rangos: 30, 90 y 180 días, con el fin de verificar los supuestos mencionados. Las probetas se mantuvieron en áreas con temperatura y humedad controladas, y fueron sometidas a los ensayos de compresión en dos fases, la primera en el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, mediante una prensa manual digital ELVEC modelo E657-1; y la segunda en los Laboratorios de enseñanza e investigación de la edificación sustentable, en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional

Autónoma de México, con una máquina de compresión marca Instron modelo 400 RD con capacidad de carga de 100 toneladas (Fig. 19 y 20).

3. También se realizaron pruebas de absorción capilar y pruebas de inmersión total en agua, con el fin de corroborar las reacciones puzolánicas y su resistencia a la intemperie. Se utilizó para ello la norma mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2013¹¹. Finalmente, se tomaron tres muestras representativas de las tapias, una vez sometidas a las pruebas de inmersión total después de seis meses y ya totalmente secas, para verificar si éstas se veían afectadas por la humedad.

Todas las pruebas antes mencionadas fueron también realizadas con probetas de 5 x 5 x 5 centímetros de cada una de las mezclas, elaborando seis especímenes por cada prueba y argamasa, como lo establecen las normas citadas. Estas probetas fueron fabricadas con materiales obtenidos en la región, en los mismos bancos de donde se extraen los recursos para construir las tapias de Tepayahualco.

Por último, con el fin de comprender cuál es la función específica de la tierra en estas tapias, se hizo una variante experimental con la mezcla T-4, en la que se introdujo la tierra en las mismas proporciones que el material de la mezcla original. Esta variante funcionó como muestra “testigo”, ya que se suponía de inicio que la tierra no tenía una función relevante dentro del sistema, debido a la alta presencia de limos, la relativamente escasa cantidad de arcillas y su bajo índice de plasticidad¹².

En la tabla de la figura 21 se muestran los resultados de las pruebas de resistencia a compresión simple, más los de la prueba testigo.

Resultados

En cuanto a las pruebas de compresión, es posible concluir que las mezclas con barro tienen una mayor resistencia en rangos similares. Estos números resultaron en cierto modo sorprendidos, ya que de las primeras inferencias hechas en campo se había obtenido la hipótesis de que la función de la tierra en estas tapias influía poco en la resistencia y la

Resistencia a la compresión simple (kgf/cm ²)	Mezcla				
	T-1	T-2	T-3	T-4	T-4a
30 días	34.84	51.33	16.85	18.85	33.97
90 días	27.31	20.36	15.18	21.78	35.28
180 días	30.47	14.69	14.29	25.14	38.75

Figura 21. Tabla de resultados de pruebas de resistencia a la compresión simple

conformación del sistema, en parte debido a la deducción de que las reacciones puzolánicas entre la cal y las rocas volcánicas empleadas en las mezclas aportaban una mayor resistencia, y en parte por el hecho de que el barro de la localidad es inestable en su comportamiento plástico. Estos supuestos resultaron falsos, pues como se aprecia en la tabla de resultados, las resistencias más bajas son las de la mezcla T-3, compuesta únicamente por excedente de cal, “poma” y *cacahuatillo*. De hecho, estas resistencias están por debajo del 50% en relación con las obtenidas en el ensayo de las mezclas que contienen barro. Asimismo, la mezcla testigo T-4a confirma que la resistencia aumentó en un promedio de un 65% al agregar tierra. Este material contribuye además a la cohesión de los elementos y a evitar que el muro se desmorone, y pudo observarse tanto en campo como en el laboratorio que las tapias y las probetas que carecen de barro son más frágiles.

Es necesario precisar que existe una excepción a estas afirmaciones, pues la mezcla T-2, que incorpora *tezontle* en lugar de la piedra pómez, tuvo a los 30 días la resistencia inicial más alta de todas, pero ésta decayó drásticamente con el paso del tiempo. Se proponen dos posibles causas: la primera, que la composición del excedente de cal, al ser un producto de desecho, no fuera uniforme ni constante, y no tuviera en esta mezcla la suficiente cantidad de óxido e hidróxido de calcio como para consolidar las reacciones puzolánicas; y la otra, que el *cacahuatillo* tuviera un comportamiento inestable dada la posible presencia de sulfatos en su composición, lo que puede inhibir la acción de la cal (Fernández 1982: 250)¹³.

Por otro lado, la cal aérea presentó resultados constantes en las pruebas realizadas con las mezclas T-4 y T-4a, y tuvo un aumento paulatino en la resistencia a compresión, que llegó a un incremento del 33% a los 180 días. Este hecho se debe a que la dosificación de la cal comercial es mucho más controlable que cuando se utilizan residuos, donde no hay manera de verificar con exactitud la cantidad y calidad del óxido e hidróxido de calcio presentes en la mezcla.

Además de los fenómenos químicos de puzolanización (Sepulcre 2005), el hidróxido de calcio puede endurecer lentamente si interactúa con el dióxido de carbono del aire, que es la reacción más conocida de esta sustancia. Así, el fraguado de estas tapias se vincula con una doble acción de la cal: como un proceso aéreo en las áreas externas y como una reacción puzolánica en su interior, donde no hay presencia de aire pero sí de agua.

En cuanto a las pruebas de absorción capilar, los rangos de absorción de las distintas muestras oscilan entre el 16 y el 32%. La mezcla que contiene *tezontle* es la que menos humedad absorbió, y, por el contrario, la que más absorbió fue la mezcla que contiene piedra pómez, *cacahuatillo* y barro. Respecto a las pruebas de inmersión total de 24 horas, ninguna de las probetas se desintegró o perdió una cantidad significativa de material durante la prueba.

La evidencia definitiva de la actividad puzolánica de un material es su resistencia, combinada con su durabilidad. Tal como afirma Sepulcre (2005), a través de exhaustivas investigaciones se han dado casos de puzolanas que no pasan las pruebas de puzolanidad, pero a pesar de ello tienen una buena actividad puzolánica. Así, a través de los ensayos realizados en esta investigación, se ha podido demostrar la actividad puzolánica, ya que no sólo se han incrementado las resistencias a lo largo del tiempo en el 90% de las pruebas realizadas, sino que también se ha demostrado su durabilidad. Al someter las probetas a ensayos de resistencia después de haber resistido las pruebas de inmersión total en agua durante 24 horas, éstas, aunque disminuyeron un poco su resistencia en condiciones totalmente adversas (alrededor de un 20% de promedio), ésta se mantuvo en rangos aceptables, según la media que marcan las normas para construcción con tierra cruda.

Conclusiones

La información encontrada en fuentes documentales y contrastada a través de la documentación directa, los levantamientos y los registros realizados, demuestra que los habitantes de la región siguen conociendo su medio y que pervive su identificación de los recursos naturales de la localidad, recursos que han sabido utilizar como materiales para la edificación. De esta forma, han encontrado soluciones adecuadas para el momento histórico estudiado y sus necesidades específicas -tales como la de vivienda emergente para resolver un asentamiento nuevo de manera rápida y expedita-, y conforme a las condiciones climáticas y ambientales del entorno -un clima agreste, con poca lluvia y escasez de recursos hídricos-. Se pudo detectar también que las soluciones constructivas estudiadas son resultado de la reunión de ideas y voluntades para la solución de los diferentes problemas planteados por el diseño y la construcción. Son evidentes en ellas las aportaciones de dos tradiciones, al poderse identificar elementos provenientes de culturas ancestrales combinados con otros de origen europeo.

Esta investigación ha tenido presente la visión plural y social que supone la participación de las comunidades. La sociedad hereda no sólo el patrimonio construido, sino también el conocimiento acumulado. Tal como afirma Hegel respecto a la tradición, “este heredar consiste a la vez en recibir la herencia y trabajarla” (Abbagnano 1963: 1147), y es así como se mantienen vivos los conocimientos y los saberes tradicionales. Esta técnica identificada en el municipio de Tepeyahualco es, de esta forma, un ejemplo de herencia recibida y trabajada, y es por esto mismo factible que estos sistemas continúen su camino dentro de cambiantes contextos socioeconómicos y culturales.

Este sistema constructivo ha surgido a partir de la adaptación de los sistemas constructivos de las tapias

de tierra y los terrados de piedra pómez y cal a las necesidades contemporáneas, echando mano de los conocimientos heredados de generación en generación, y continuando con una cadena de transmisión que no ha sido rota, a pesar de la introducción de materiales y técnicas constructivas industrializadas. El conocimiento local aún es valorado, situación que no se observa en otros sitios y con otras tradiciones constructivas de México. Un factor determinante para que estas arquitecturas perduren, que va más allá del valor económico y de mercado, es la valoración social del conocimiento, principalmente dentro de la comunidad y por los propios usuarios.

Esos hechos, aunados al trabajo experimental en laboratorio, permiten afirmar que las tapias de “poma” y cal optimizan procedimientos y materiales respecto a los precedentes de los que surgen, ya que ofrecen una mayor rapidez en la ejecución pero conservan su simplicidad constructiva, al tiempo que suponen un ahorro en material, un mejor funcionamiento mecánico, un menor mantenimiento y mayores periodos de vida útil. Así, esta experiencia de fusión de tradiciones constructivas puede competir, dentro de la tradición constructiva local, con la arquitectura importada de ámbitos urbanos.

Uno de los puntos fundamentales de esta técnica, del que se desprenden múltiples lecciones, es el aprovechamiento de recursos que en otros contextos tienen poco valor o son considerados desechos. La necesidad de echar mano de lo que se tiene en el entorno inmediato y la reutilización de estos materiales comúnmente considerados inservibles contribuyen así al fortalecimiento de la economía local y evitan el transporte de materiales, lo que supone ahorros significativos tanto económicos como ambientales. Aquí es posible hacer referencia a la dimensión ética que distingue al conocimiento de la sabiduría, entendida como la habilidad que se desarrolla con la aplicación de la inteligencia desde la experiencia, que permite discernir sobre lo conveniente o no de un conocimiento. El conocimiento que no ha pasado por la experiencia carece a veces de esa dimensión ética, pero esta experiencia es buena muestra de cómo es posible hacer que converjan dos maneras de conocer y de aprehender: por un lado, la experiencia directa del hacer y, por otro, el conocimiento académico. Es importante señalar que esta investigación permitió estudiar el fenómeno arquitectónico y constructivo desde una perspectiva integral y colaborando con los miembros de la comunidad. Adoptar esta postura permitió comprender no sólo una técnica concreta en su dimensión material, sino también las dinámicas de aprendizaje y transmisión del conocimiento que subyacen en una tradición, y aprender de los saberes que forman parte de ella, así como valorarlos de forma apropiada.

Como reflexión final, esta investigación ha sido una combinación de ciencia, empirismo y cultura. La confluencia del saber tradicional, el conocimiento aportado por la ciencia y la valoración social del aprendizaje puede ayudar

a encontrar soluciones más adecuadas y contextualizadas y contribuir a encontrar caminos orientados al desarrollo de propuestas más sostenibles en el ámbito de la arquitectura.

¹ Agustín Cervantes Cruz, comunicación personal en una entrevista, 2014.

² Las puzolanas son materiales que en sí mismos no poseen propiedades cementantes, pero que reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio (cal hidratada), al encontrarse finamente divididos y en presencia de agua, a temperatura ambiente. Deben su nombre a una ceniza volcánica ya empleada por los romanos en la zona de Pozzuoli, Italia, hace más de 2000 años. El término se generalizó para referirse a suelos y rocas volcánicas con características similares. Así, una reacción puzolánica se define como un conjunto de fenómenos que transforman una mezcla de puzolana, hidróxido de calcio (cal hidratada) y agua en un material compacto de aspecto pétreo. Para mayor detalle a este respecto, consultar Guerrero y Soria (2014), Sepulcre (2005) y Fernández (1982).

³ El video resumido puede consultarse en <https://arquitectura.unam.mx/procedimientos-y-sistemas-constructivos.html>

⁴ Para información detallada sobre el ciclo de la cal y sus procesos de obtención y transformación, consultar Tovar (2016).

⁵ Agustín Cervantes Cruz, comunicación personal en una entrevista, 2014.

⁶ Bloques de tierra estabilizados con cal: Especificaciones y métodos de ensayo.

⁷ Cal viva: Especificaciones y métodos de ensayo.

⁸ Cal hidratada: Especificaciones y métodos de ensayo

⁹ Resistencia a compresión de mampuestos.

¹⁰ Método estándar de prueba de resistencia a compresión de probetas cilíndricas de hormigón.

¹¹ Determinación de la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones: Método de ensayo.

¹² Límite líquido: 42.5. Límite plástico: 29.90. Clasificación SUCS: ML, suelo limo-arcilloso de baja plasticidad.

¹³ Este fenómeno continúa analizándose en experimentos de laboratorio que no es posible detallar en este trabajo, pero que hasta el momento han arrojado datos interesantes respecto a las mezclas que contienen *tezontle*. En diversos ensayos éstas alcanzaron resistencias similares a las especificadas para construcción de mampuestos con ladrillo rojo recocido, uno de los materiales más comunes en la construcción de vivienda en México.

Bibliography | Bibliografía | Bibliografia

- Abbagnano, Nicola. 1963. *Diccionario de filosofía*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- ASTM C39.2018. *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Estados Unidos: ASTM International.
- ASTM D2487-11.2011. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Estados Unidos: ASTM International.
- Capra, Fritjof; y Luisi, Pier Luigi. 2014. *The Systems view of life: A unifying vision*. Cambridge: University Press.
- Cervantes Cruz, Agustín; García Cook, Angel, y Limón Rivera, Vinicio. 2014. *Tepeyahualco: identidad de un pueblo*. Puebla: Secretaría de Educación Pública/Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
- Fernández Loaiza, Carlos. 1982. *Mejoramiento y estabilización de suelos*. Ciudad de México: Limusa.
- García Cook, Angel. 2014. Cantona. En Cervantes Cruz, Agustín (coord.). *Tepeyahualco, identidad de un pueblo*, 13-15. Puebla: Secretaría de Educación Pública/Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
- Guerrero Baca, Luis. 2011. Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia. *Bitácora Arquitectura*, 22: 6-13.
- Guerrero Baca, Luis y Soria López, Francisco. 2014. Estabilización de suelos con cal y puzolana. *Construcción con tierra*, 6: 15-24. Buenos Aires: Centro de Investigación Hábitat y Energía. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires.
- Guerrero Baca, Luis; Roux Gutiérrez, Rubén; y Soria López, Francisco. 2014. Edificación de muros de tierra vertida estabilizados con cal y puzolanas. En Castellanos Ochoa, Magda (comp.). *Arquitectura de Tierra: patrimonio y sustentabilidad en regiones sísmicas. Memorias del 14º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra*: 192-197. San Salvador: Fundasal/Proterra.
- Muñoz Espejo, Francisco. 2006. Camino Real de Veracruz-México. Por las veredas de la historia. *Revista patrimonio cultural y turismo. Cuadernos*, 15: 210-223. Ciudad de México: Coordinación Nacional de Patrimonio y Turismo, CONACULTA.
- NMX-C-003-ONNCCE. 2015. *Industria de la construcción- Cal hidratada. Especificaciones y métodos de ensayo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-036-ONNCCE.2013. *Industria de la construcción-mampostería-resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines -método de ensayo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-037-ONNCCE.2013. *Industria de la construcción-mampostería-Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones -método de ensayo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-508-ONNCCE.2015. *Industria de la construcción-Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Especificaciones y métodos de ensayo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-513-ONNCCE.2015. *Industria de la construcción-Cal viva. Especificaciones y métodos de ensayo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- Sepulcre Aguilar, Alberto. 2005. *Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico*. Tesis doctoral. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. No publicada.

Tovar, Rosario. 2016. *La Cal. Ciencia, tecnología y arte*. Ciudad de México: Editorial Trillas.

Biography | Biografía | Biografia

María de los Ángeles Vizcarra de los Reyes

Es Arquitecto, Máster en Diseño Arquitectónico y Doctora en Arquitectura por la Facultad de Arquitectura de la UNAM, donde es Profesora del área de Proyectos desde 1992 e Investigadora del Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje desde 1998. Coordina desde 2014 el Laboratorio de Procedimientos y Sistemas Constructivos Tradicionales como Alternativa para una Arquitectura Sustentable (LABPySCT), con sede en la misma Universidad. Ha colaborado en diversas publicaciones, entre ellas *Naturaleza en el Habitar 01: Tradiciones constructivas en madera y fibras naturales*, premiada con mención honorífica en la XV Biental nacional e internacional de arquitectura mexicana.