



Eficiencia de la Piedra Pómez (P-HU) como absorbente de humedad capilar para la salvaguarda de acervos documentales

Efficiency of Pumice (P-HU) as a capillary moisture absorber for the safeguarding of documentary collections

Robles-Camacho Jasinto

Instituto Nacional de Antropología e Historia Centro INAH Michoacán
Laboratorio de Arqueometría de Occidente (LARQUEOC)
Correo: jasinto_robles@inah.gob.mx
<https://orcid.org/0000-0002-2257-5775>

Sereno-Villaseñor Hugo Iván

Instituto Nacional de Antropología e Historia Centro INAH Michoacán
Laboratorio de Arqueometría de Occidente (LARQUEOC)
Correo: hugoivansereno@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8413-9218>

Cortés-Esquivel José Luis

Instituto Nacional de Antropología e Historia Centro INAH Michoacán
Laboratorio de Arqueometría de Occidente (LARQUEOC)
Correo: luiguinet19@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6782-7801>

González-Garrido Ricardo Miguel Ángel

Sección de Monumentos Históricos
Instituto Nacional de Antropología e Historia Centro INAH Michoacán
Correo: ricardo_gonzalez@inah.gob.mx
<https://orcid.org/0000-0002-2296-3460>

Pola-Villaseñor Antonio

Laboratorio de Mecánica de Rocas
Escuela Nacional de Educación Superior-UNAM Campus Morelia
Correo: apola@enesmorelia.unam.mx
<https://orcid.org/0000-0002-6012-6620>

Cedillo-Rodríguez Fidel †

Comisión Federal de Electricidad
Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla

Resumen

La ciudad de Morelia es la capital del estado de Michoacán de Ocampo (México) y su centro histórico cuenta con una declaratoria de zona de monumentos históricos, ésta fue publicada el 19 de diciembre de 1990. El 12 de diciembre de 1991 fue inscrita como patrimonio cultural de la Humanidad por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Entre las características de su centro histórico destaca la uniformidad de roca ignimbrítica color rosa, usada como material constructivo recubierto y sillares. Sin embargo, el problema de humedad por ascenso capilar afecta considerablemente a los inmuebles del Centro Histórico a través de dos factores principales: 1) la porosidad de la roca, que promedia los $\sim 10 \mu\text{m}$ y tiene una conectividad del orden de 80 % y 2) niveles freáticos someros con una alta tasa de recarga acentuada durante el periodo de lluvias (mayo a junio). Entre las características de esta importante ciudad colonial se cuenta el resguardo común de acervos documentales y bibliotecas tanto públicas como particulares. Uno de ellos es el archivo de la Sección de Monumentos Históricos del Centro INAH Michoacán, integrado desde hace más de cuatro décadas y que concentra sistemáticamente los datos constructivos e intervenciones en inmuebles del siglo XVI al XIX de todo el estado. Este acervo ocupa un espacio específico en la planta baja del inmueble conocido como Palacio Federal de Morelia, donde la humedad por ascenso capilar es intensa. Para intentar minimizar o desaparecer la humedad que ponía en riesgo este importante acervo, se aplicó una metodología con materiales naturales, donde el uso de piedra pómez hizo eficiente el proceso de resguardo del acervo. Luego de una serie de pruebas, se observó que la piedra pómez P-HU muestra valores de densidad real (ρ_r) en el rango de las rocas de composición riolítica, sin embargo, su densidad aparente (ρ_a) se encuentra en un rango $< 1\text{g/cm}^3$, menor a la densidad del agua y directamente relacionada con su alta porosidad. Asimismo, la interconectividad entre poros es del orden de 70 %, donde se resalta que la dinámica hídrica de la pómez está relacionada y acotada únicamente por la porosidad accesible al agua. Con base en los resultados generales, las propiedades hídricas están vinculadas estrechamente con la distribución, el tamaño e interconexión de los poros de la pómez. En la práctica, el material en cuestión es altamente eficiente y permite proyectarlo como una opción confiable para la captura de humedad en espacios donde, particularmente, se resguardan libros o documentos de valor cultural o histórico; sin que sea la única aplicación de este material con posibilidades de éxito.

Descriptor: Humedad por ascenso capilar, acervo documental, pómez, porosidad, ignimbrita.

Abstract

The city of Morelia is the capital of the state of Michoacán de Ocampo (Mexico) and its historic center has a declaration of zone of historical monuments, published on December 19, 1990. On 12 December 1991 it was registered as a World Heritage Site by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Among the characteristics of its historic center stands out the uniformity of pink ignimbrite rock, used as a construction material and ashlar. However, the problem of humidity due to capillary ascent considerably affects the buildings of the Historic Center through two main factors: 1) the porosity of the rock, which averages $\sim 10 \mu\text{m}$ and has a connectivity of the order of 80 % and, 2) shallow water tables with a high rate of recharge accentuated during the rainy period (May to June). Among the characteristics of this important colonial city, there is the common protection of documentary collections and libraries both public and private. One of them is the archive of the Section of Historical Monuments of the Centro INAH Michoacán, integrated for more than four decades, which systematically concentrates the construction data and interventions in buildings from the sixteenth to the nineteenth century throughout the state. This collection occupies a specific space on the ground floor of the building known as the Palacio Federal de Morelia, where the humidity due to capillary ascent is intense. To try to minimize or disappear the humidity that put this important collection at risk, a methodology was applied with natural materials, where the use of pumice stone made the process of safeguarding the collection efficient. After a series of tests, it was observed that the P-HU pumice stone shows values of real density (ρ_r) in the range of rhyolitic composition rocks, however, its apparent density (ρ_a) is in a range $< 1\text{g/cm}^3$, less than the density of water and directly related to its high porosity. Likewise, the interconnectivity between pores is 70 %, where it is highlighted that the water dynamics of the pumice stone is related and bounded only by the porosity accessible to water. Based on the overall results, water properties are closely linked to the distribution, size and interconnection of pumice pores. In practice, the material in question is highly efficient and allows it to be projected as a reliable option for moisture capture in spaces where, in particular, books or documents of cultural or historical value are protected; without it being the only application of this material with a chance of success.

Keywords: Humidity by capillary ascent, documentary collection, pumice, porosity, ignimbrite.

INTRODUCCIÓN

Las bibliotecas públicas y sus acervos documentales han sido tradicionalmente ubicados en la planta baja de inmuebles de diferente categoría: Monumentos históricos, edificios contemporáneos o modernos, construidos con materiales y tecnología de su época. Esta disposición de uso de planta baja puede o no estar reglamentada, ya que el principal argumento es el peso acumulado de los documentos o libros y los libreros o archiveros que los contienen. Es inevitable que, en la mayoría de los casos como el que aquí se aborda, la humedad por ascenso capilar aparezca y obligue a implementar diversas medidas de protección para los bienes documentales. En muchos casos se ha tenido la mala experiencia de perder acervos o parte de ellos, convirtiéndose ésta en una verdadera tragedia en el trabajo cotidiano por recuperar la memoria histórica de un lugar o de una sociedad.

Como antecedente, se reconoce que en México el uso de rocas de naturaleza volcanosedimentaria conocida como ignimbrita ha sido extenso, debido a sus propiedades físico-mecánicas como compactación, dureza, densidad, colores; un ejemplo son las esculturas y elementos estructurales de edificios históricos (López *et al.*, 2015; López *et al.*, 2016). Un caso particular donde se han empleado exclusivamente ignimbritas en el corpus de los edificios históricos y emblemáticos, es la ciudad de Morelia, Michoacán, que cuenta con una declaratoria de Zona de Monumentos Históricos publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) de fecha 19 de diciembre de 1990; un año después, el casco antiguo de esta ciudad fue incluido en la lista de ciudades patrimonio mundial por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el 12 de diciembre de 1991. Una de las características sobresalientes de esta ciudad, es su alta homogeneidad estética, otorgada por el uso mayoritario de una roca ignimbítica color rosa, llamada Cantera Rosa, o recientemente referida como Piedra Vieja (PV) por Martínez *et al.* (2018). En este sentido, la zona de monumentos históricos de Morelia está constituida por 219 manzanas, en donde se ubican: 1,113 obras civiles relevantes, 20 edificios religiosos y 14 plazas, jardines y fuentes, construidos entre los siglos XVI al XIX (Serenó, 2020).

Diversos autores como Martínez *et al.* (2018) y Sereno (2020) han estudiado las diferentes patologías en el corpus de los edificios históricos de Morelia, destacando que, la mayoría de las alteraciones están asociadas a problemas de ascensión capilar de agua, alcanzando, en algunos casos hasta 2 metros de altura de mancha capilar. Esto derivado, por un lado, de la arquitectura de sistema poroso de PV (diámetro medio de poro de $\sim 10 \mu\text{m}$ y gran conectividad $< 80 \%$) y, por otro lado, a

niveles freáticos someros con una alta tasa de recarga acentuada durante el periodo de lluvias (mayo a junio).

Uno de los edificios más emblemáticos del Centro Histórico de Morelia es el conocido como Palacio Federal, iniciada su construcción en el siglo XVIII, con intervención mayor en el siglo XIX (1890-1891) por el Ingeniero Adolfo André Tremontels, quien tomó en cuenta y aprovechó las partes del conjunto dominico que a esas fechas se habían salvado de la picota e introdujo sillares de cantera de tono más gris y menor resistencia mecánica que la roca usada en el inicio de la obra; visible en las fachadas sur y este del inmueble, modificadas de un estilo barroco a uno afrancesado, con adecuaciones al interior para dar cabida al Colegio Teresiano de Santa María de Guadalupe para niñas, función que cumplió de 1891 hasta 1914 cuando el colegio cerró (Vargas, 2020) (Figura 1). En el corpus del interior de este edificio, constituido parcialmente por rocas de la unidad PV, se ha reportado la aparición de humedad en planta baja, con efectos a diferente altura; dependiendo de la topografía y de las intervenciones que han pretendido abatir este efecto (Figura 2). En trabajos recientes sobre análisis de la humedad como causa de la degradación de acervos documentales de valor histórico, se ha identificado un colapso en las propiedades físicas-mecánicas del papel y difusión de las tintas; con el incremento de humedad aumenta la posibilidad de aparición y colonización de microorganismos (p. ej. hongos), que han llevado a la destrucción parcial o total de colecciones documentales Padoan *et al.* (2008); Havlínová *et al.* (2009); Rojas *et al.* (2012).

Aunque la humedad es común en la planta baja del inmueble citado, es de particular interés para el presente estudio abordar el tema del tratamiento para eliminar el exceso de humedad en el espacio destinado al Archivo documental de la Sección de Monumentos Históricos del Centro INAH Michoacán (ASMH; Figura 3). Como medida correctiva se ha propuesto el uso de pómez como material adsorbente, por ser un producto natural constituido mayormente por vidrio volcánico poroso, al que además se atribuyen propiedades higroscópicas; su formación se debe a un enfriamiento rápido de magma, donde características físicas como la porosidad, capilaridad y compactación se deben a los procesos de emplazamiento, tasa de gases liberados y quimismo. La porosidad es una propiedad particular que en condiciones naturales alcanza $> 40 \%$ del volumen total de la roca e incluso llega a flotar en agua (Pola *et al.*, 2012, 2016; Navelot *et al.*, 2018; Rangel *et al.*, 2018).

Con base en lo anterior, el presente trabajado se enfoca en dos temas: 1) La caracterización petrofísica e hídrica de la piedra pómez (P-HU) proveniente de la localidad Frijol Colorado, de la Caldera de Los Humeros, Puebla

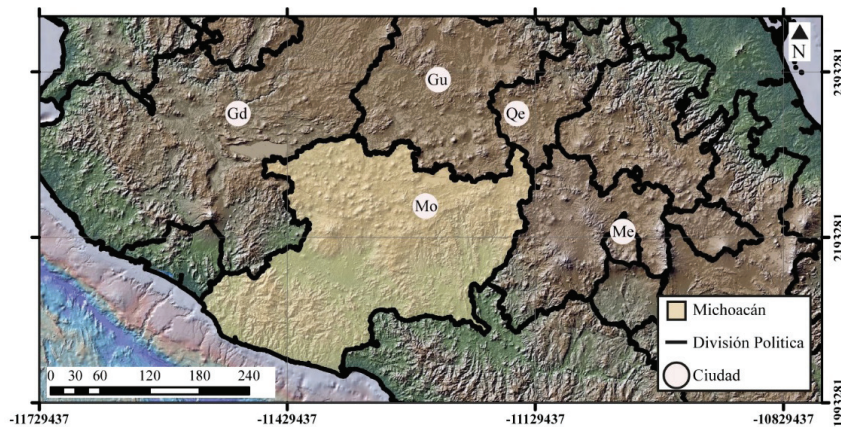


Figura 1. Localización de la ciudad de Morelia y fachada del Palacio Federal con evidencias del impacto de humedad por ascenso capilar (línea en amarillo; altura mayor de 2 m). Nomenclatura: Gd, Guadalajara, Gu, Guanajuato, Qe, Querétaro, Mo, Morelia, Me, Ciudad de México



Figura 2. Efecto de la humedad ascendente por capilaridad en el interior del Palacio Federal: a) A una altura de 1.50 m, luego de intervención con aplanados impermeables, b) Inmediata al piso en planta baja de la Arqueoteca, previo a intervención; imagen de exploración geofísica para ubicar concentraciones de humedad

Ferriz & Mahood, (1984); 2) El análisis del registro de humedad en pómez P-HU colocadas en el local del ASMH, obtenidas durante un periodo de dos meses Cortés & Robles (2018). Se pondera la capacidad de este material para retener humedad ambiental, comparada con pómez de otras localidades en México, de acuerdo con criterios de estandarización internacional ASTM (American

Society for Testing and Materials, por sus siglas en inglés) y UNE (Una Norma Española). Es importante enfatizar que se trata de un material sobre el cual y con el paso de los años, se descubren nuevos usos en ámbitos como el de la construcción, la agricultura, de remediación, entre otros; además de su tradicional uso como producto abrasivo en labores del hogar e industria de las

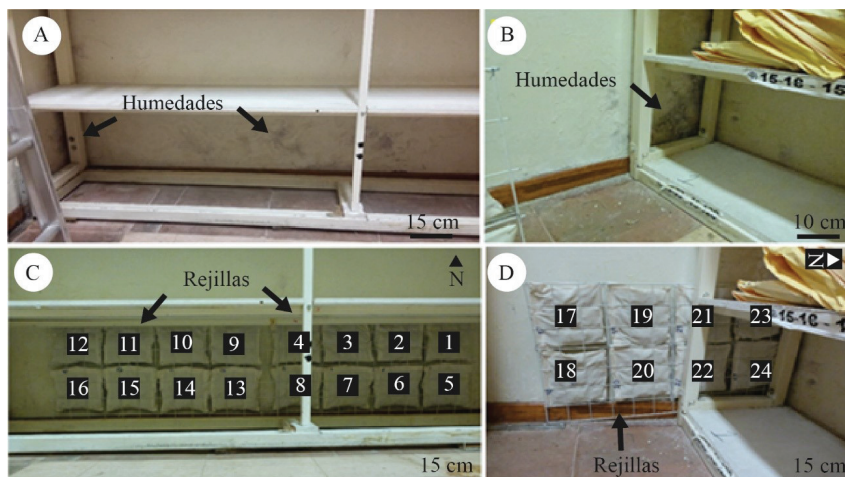


Figura 3. Montaje y colocación de las bolsas en el reservorio del acervo histórico documental: a) Humedades en el muro norte, b) Humedades en el muro perpendicular con orientación este, c) Montaje de las rejillas en el muro norte, d) Montaje de las rejillas en el muro este. Nomenclatura: Los cuadros negros representan el número de bolsa

telas (deslavado de mezclilla); el caso de estudio que se presenta es clásico de acervos ubicados en la planta baja de un inmueble considerado Monumento Histórico, bajo la legislación de los Estados Unidos Mexicanos y normada por la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas.

Finalmente, la metodología con sus criterios y resultados, son evaluados para su tentativa réplica en reservorios documentales de naturaleza similar; debiendo certificar previamente las propiedades del material por emplear.

METODOLOGÍA

La metodología usada para los análisis petrofísicos e hídricos del presente caso de estudio se basó en los criterios técnicos de la ASTM y de UNE, con el objetivo de ubicar los presentes resultados en un contexto global certificado. Para fines prácticos se ha dividido el trabajo en dos secciones, el primer apartado se refiere a la caracterización detallada de muestras de pómez de varias localidades de México; la segunda parte refiere un caso práctico de aplicación de las propiedades de la piedra pómez para eliminar humedad capilar ascendente en el reservorio documental de la Sección de Monumentos Históricos del Centro INAH Michoacán, en el Palacio Federal de Morelia.

CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA E HÍDRICA DE LA PÓMEZ

La densidad real de la roca (ρ_r) se obtuvo mediante la implementación del picnómetro de intrusión de helio de ultra alta pureza (99.999 %) Ultrapyc 1200e empleando la norma internacional ASTM D5550-2014. Se elaboraron 5 cilindros de 1 pulgada de diámetro y 2 pulgadas de altura (relación 1:2) bajo la normativa ASTM D7263-09. En este sentido, la determinación de la densidad

aparente (ρ_b) y de la porosidad abierta (η_a) y total (η_t) de los especímenes se realizó con base en las normas UNE-EN 1936:2006. En particular, estos parámetros muestran la relación que existe entre el grado de conectividad y distribución del sistema poroso, como una función del volumen de la roca.

Por otro lado, para la caracterización a detalle de las propiedades hídricas, se determinó el coeficiente de absorción de agua por capilaridad (C) bajo el marco de la normativa UNE-EN 1925, 1999, el cual indica la cantidad de agua absorbida capilarmente por unidad de área y tiempo; las rocas más eficientes capilarmente presentan coeficientes de capilaridad más grandes. La determinación del coeficiente de absorción se realizó con base en la norma UNE-EN 13755. Este coeficiente es función de la cantidad de agua que puede absorber una roca por metro cuadrado. En general, rocas con alto coeficiente de absorción ($C > 30\%$) tendrán una conectividad muy elevada. Por último, se determinó la permeabilidad absoluta (K) con la implementación del permeámetro de gas modelo GasPerm Prod modelo Ap-123-002-0 utilizando la norma internacional ASTM D4525 - 13, 2018.

UTILIZACIÓN DE LA PIEDRA PÓMEZ COMO MATERIAL HIGROSCÓPICO PARA PROTEGER UN ACERVO DOCUMENTAL

Se diseñaron 24 bolsas de manta con un tamaño de 20 cm x 22 cm cada una. Como característica particular, un lado de cada bolsa está constituido con una abertura de manta de aproximadamente 2 mm (expuesto a la humedad del muro) y el lado opuesto se realizó con manta cerrada (expuesto a documentos) (Figura 3). Dentro de estas bolsas, con aberturas en la parte superior, fueron colocadas piedras pómez secas de 3 cm de diámetro, y selladas. El siguiente paso consistió en pesar cada bolsa y agregar etiqueta, para su colocación en rejillas metáli-

cas con cubierta de pintura horneada. Se instalaron tres rejillas con ocho bolsas cada una. Asimismo, se midió la humedad relativa del archivo documental histórico todos los días a las 10:00 h y 19:00 h durante dos meses, tiempo de duración del experimento; se implementó la consola del equipo Vantage Vue, con precisión de $\pm 3\%$.

Por último, a lo largo de los dos meses se colocaron las rejillas con las bolsas en contacto con dos manchas de humedad persistente del muro norte de la sala, para registrar la cantidad de agua absorbida a partir del incremento de peso en gramos, determinada con la siguiente fórmula:

$$[(\text{Peso húmedo} - \text{Peso Seco}) / \text{Peso Seco}] * 100 = \text{Absorción (\%)}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA E HÍDRICA DE LA PÓMEZ

Las Tablas 1 y 2 muestran los resultados generales de las pruebas petrofísicas e hídricas de las pómez de Los Humeros (P-HU), respectivamente. Los resultados se representan con valores promedio y desviación estándar, con el objetivo de caracterizar de manera global las propiedades. La pómez muestra una densidad real (ρ_r) en el rango de rocas riolíticas (Gupta & Sharma, 2012). Sin embargo, derivado de su alta porosidad total (η_t) se observa que la densidad aparente (ρ_a) es de $\sim 0.46 \text{ g/cm}^3$. En este sentido, este valor se coloca en un rango inferior a la ρ_b del agua, provocando incluso que la roca tenga la posibilidad de flotar. Es importante destacar que, el $\sim 80\%$ de la roca son espacios vacíos (poros), asimismo, este sistema de poros muestra una elevada interconectividad ($\eta_e > 70\%$). Los valores son esperados, debido a que en este tipo de rocas la interconexión de los poros depende de diferentes características genéticas del depósito como la desgasificación, y en el caso de los fragmentos de pómez, en los procesos de desfragmentación de magma.

Las propiedades hídricas están directamente relacionadas con las propiedades físicas, especialmente con la distribución del tamaño de poro y la arquitectura del sistema poroso. La permeabilidad absoluta de la uni-

dad es de $\sim 1105.8 \text{ mD}$. Como se describe gráficamente en la Figura 4, la posición y distribución de las presiones medias están estrechamente vinculadas con el flujo que el sistema permite pasar. Puntos menos espaciados están relacionados con tamaños de poros más pequeños y sistemas más complejos. Si se comparan las gráficas de la permeabilidad de los fragmentos de pómez de los Humeros y del Chichón (Torres, 2020), se puede identificar que los valores de permeabilidad del gas se encuentran en un mismo rango, con la diferencia de distribución de la presión media; se podría interpretar que las muestras de los Humeros están compuestas por un rango de poros más pequeños. Asimismo, se aprecian las diferencias que tiene con las rocas de litología ignimbrita. En general, encontrándose estas últimas en rangos poco permeables.

Los valores representativos de la capilaridad (C_1 y C_2), representan cambios en el comportamiento de la velocidad de ascenso del agua en los especímenes y están determinados por el punto de inflexión en las gráficas (ver Tabla 2, Figura 3a). En general, cuanto mayor sea el coeficiente, más rápido absorberá agua en el tiempo. Cada uno de los coeficientes representan la pendiente de la absorción de agua en un periodo específico del tiempo, la cual es función del porcentaje de poros y su distribución de tamaño. Se muestra que, los valores de C_1 tienen una clara disminución en el tiempo y los cambios en la dinámica están condicionados por las familias de poro en las rocas. Específicamente para los fragmentos de pómez de los Humeros, se tiene un coeficiente C_1 muy elevado ($\sim 494.5 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{1/2}$), que implica una rápida absorción inicial de agua; sin embargo, una vez que los poros relacionados con esta absorción inicial están saturados, la dinámica cambia y es mucho más lenta ($\sim 69.35 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{1/2}$) que las otras unidades. Por otro lado, los fragmentos de pómez de El Chichón (CH-01) se mantienen absorbiendo durante más tiempo de manera constante con una tasa mucho más baja. Es importante mencionar que, los fragmentos de pómez Chichón (CH-01), absorben de una manera lenta en el tiempo, además, tienen mucha dificultad en evaporar agua en el tiempo. (Figura 5).

Tabla 1. Caracterización petrofísica de las rocas en estudio

ID	ρ_r (g/cm^3)	ρ_a (g/cm^3)	η_t (%)	η_e (%)
P-HU	2.22 ± 0.006	0.46 ± 0.014	79.21 ± 8.1	73.03 ± 2.3

Tabla 2. Caracterización hídrica de las rocas en estudio

ID	K (mD)	C_1 ($\text{g/m}^2 \text{ s}^{1/2}$)	C_2 ($\text{g/m}^2 \text{ s}^{1/2}$)	ABS (%)	Tc (h)	Gec (%)
P-HU	1105.8 ± 50	494.5 ± 8.3	69.36 ± 10	171 ± 25	8	-80.6 ± 3.3

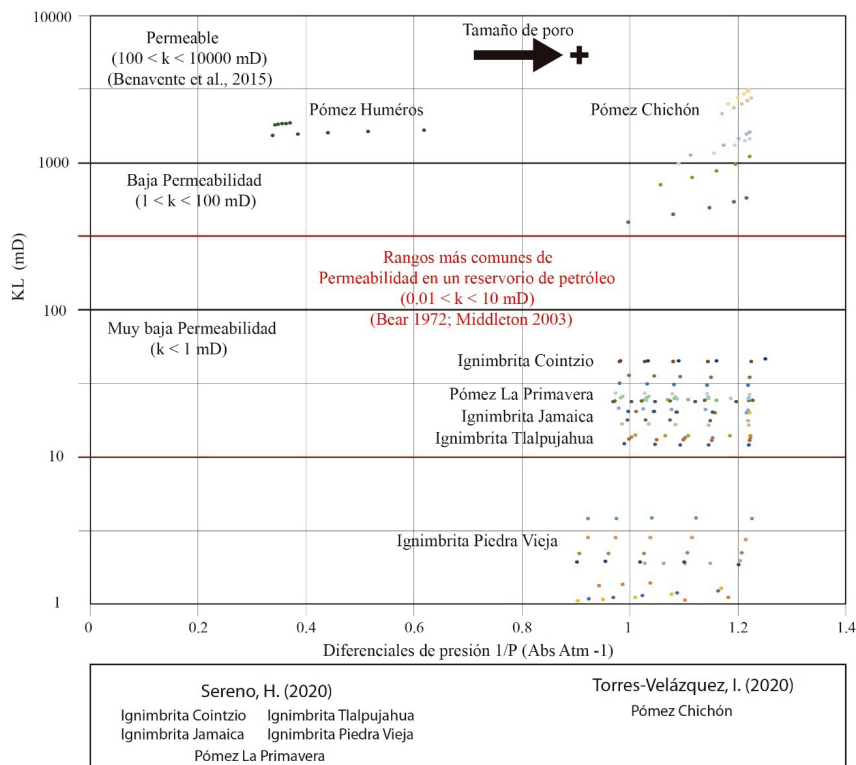


Figura 4. Relación de la permeabilidad respecto a la presión media en cinco diferentes puntos de presión para diferentes unidades de roca. Se incluyen datos extraídos de Sereno (2020) y Torres (2020)

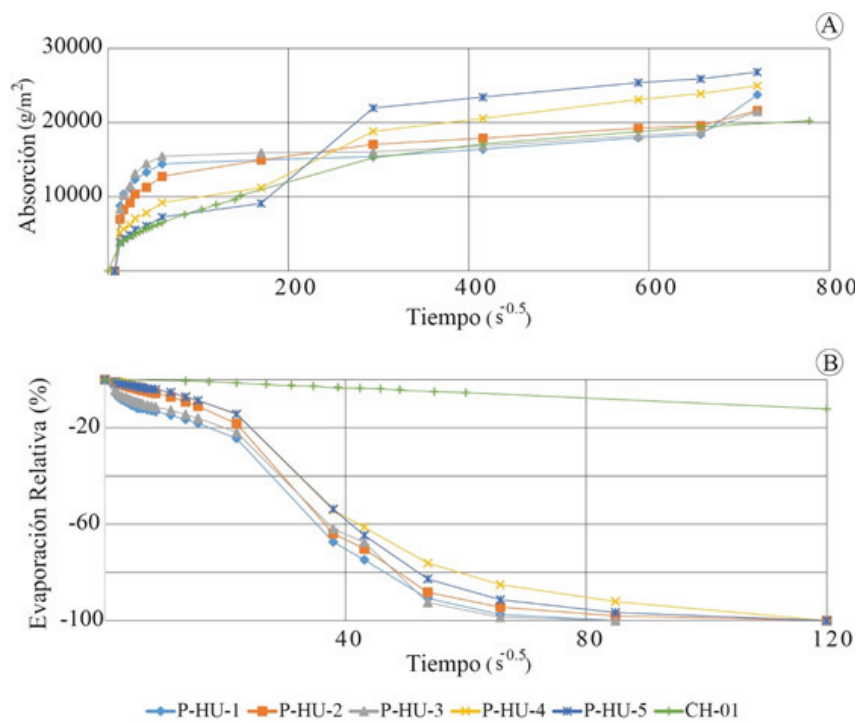


Figura 5. Dinámica de las propiedades hídricas de las pómez en estudio. Evaporación de los distintos fragmentos de pómez; provenientes de la misma localidad

Asimismo, la evaporación está estrechamente relacionada con la distribución del tamaño de poros de la roca. De manera análoga a la capilaridad, el rango de tamaño de poros más eficiente para la evaporación está entre 1 y 1000 μm (poros más pequeños suelen dificultar la evaporación). Los resultados de la evaporación se representan gráficamente con la relación de la evaporación relativa contra la raíz del tiempo en las gráficas (Tabla 2, Figura 3b). Esta relación permite identificar el tiempo crítico de secado (T_c) y el contenido de humedad crítica, los cuales representan un cambio en la evolución de la evaporación del agua en el espécimen y están relacionados con el tiempo y la magnitud de secado en los especímenes. Si se comparan todas las muestras en conjunto se puede notar que los especímenes de los Humeros evaporan de manera más rápida, en general debido a que cuenta con tamaño de poro eficiente.

UTILIZACIÓN DE LA PIEDRA PÓMEZ PARA ABSORBER HUMEDAD EN EL RESERVORIO DEL ASMH

Los pesos iniciales de las bolsas antes de la implementación de la prueba se encontraron en los rangos de 280.9 – 324.9 g. En este sentido, al primer mes de exposición se registraron aumentos con una variación entre 1.1 – 8.6 g. Mientras que, para el segundo mes la cantidad de agua absorbida tuvo un incremento menor, respectivamente, con variación de peso entre el rango de 0.4 – 4.3 g. Finalmente, la cantidad de agua absorbida durante los dos meses del experimento fue entre 2.6 y 11.8 g por bolsa. De manera gráfica, la Figura 6 muestra los incrementos de pesos relacionados con la humedad a lo largo del tiempo. En este sentido, se puede observar cómo se agrupan en el mes 1 las zonas con mayor absorción de agua (ZDH). Asimismo, se aprecia que en el segundo mes el incremento de humedad disminuyó de

manera drástica en estas regiones, debido al efecto de absorción por capilaridad de las pómez.

En la Figura 7 se ilustran mediante diagramas de contorno los puntos donde las humedades son más persistentes. En este sentido, se observa que para los dos muros en el primer mes se encontraron flujos de humedad importantes (hasta 60 cm de altura). Estos flujos conservan una tendencia de ascenso capilar considerable de agua; relacionado probablemente con la posición de los sillares del corpus del edificio o a juntas de mortero. Es importante determinar la dinámica del ascenso de agua para disponer las bolsas en los lugares correctos. Como se puede observar, esta metodología permite reconocer con mucha precisión las áreas preferentes de los flujos de humedad.

Para el muro norte, en el primer mes se observa un flujo sub-vertical con grandes cantidades de absorción focalizadas. En el segundo mes se mantiene la misma tendencia, sin embargo, como es visible, el aumento de peso en las bolsas disminuyó drásticamente. Por su parte, en el muro este la humedad está focalizada en la esquina y manifiesta un flujo de ascenso capilar diagonal. Esta dinámica en el ascenso está estrechamente relacionada con un flujo persistente a través de los sillares. Para el segundo mes, la humedad disminuyó de manera notable. Asimismo, se aprecia un decremento drástico en el flujo de agua.

Como se mencionó anteriormente, el ascenso capilar guarda una relación estrecha con las propiedades hídricas de los sillares de litología PV, cuyas características petrofísicas e hídricas (p. ej. tamaño de poro medio y permeabilidad) condicionan la dinámica del flujo. En este sentido, PV tiene una alta transmisión capilar de agua. Sin embargo, derivado de la alta porosidad y absorción de P-HU se obtiene una excelente retención de flujo.

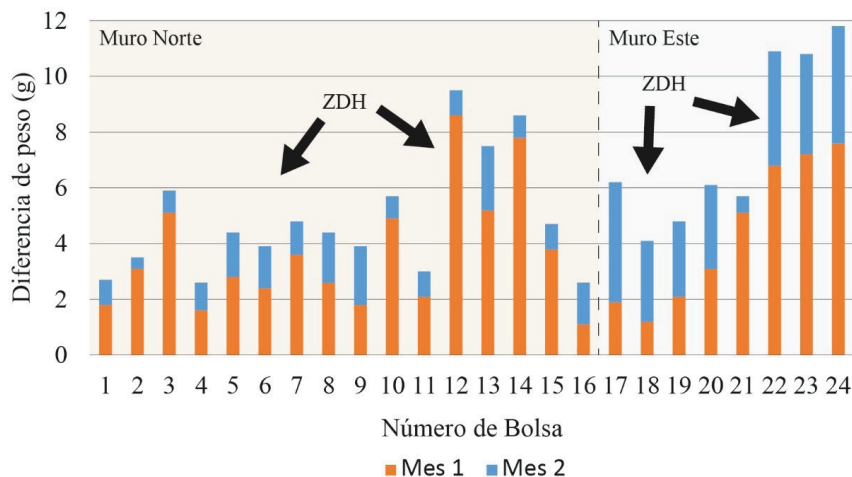


Figura 6. Histograma de aumento de pesos en las muestras por absorción de humedad en los dos meses de exposición. Nomenclatura: ZDH, Zonas de Humedad

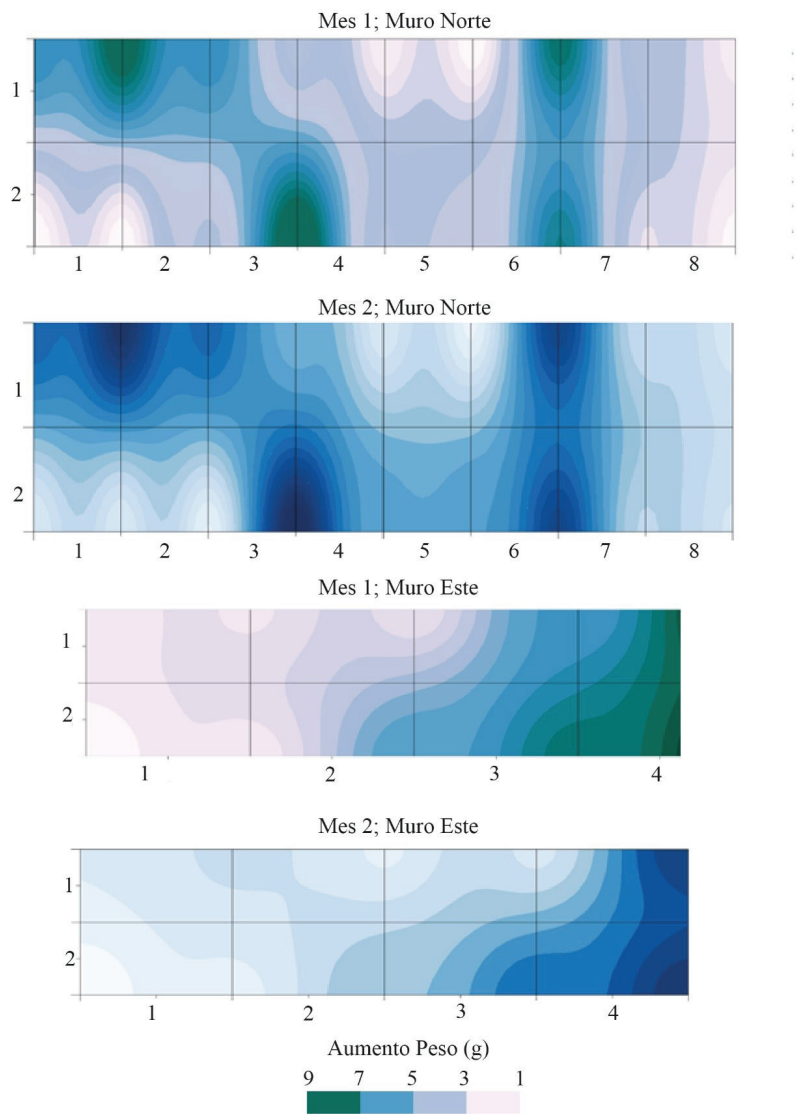


Figura 7. Diagrama de superficie continua con el aumento de la absorción de humedad en gramos; comparación de humedad absorbida entre el primer y el segundo mes del experimento

Las lecturas de humedad relativa dentro de la sala del ASMH mostraron una clara tendencia de porcentajes elevados de humedad durante la primera lectura del día (Figura 8a). En este sentido, la mayoría de los días mostró una tendencia a la baja con excepción de aquellos días en los que llovía durante el día; esta característica se aprecia mejor en los registros de los meses de junio, mientras que en abril y principios de mayo se muestran los menores porcentajes de humedad tanto en la primera toma del día como en la segunda toma. Los picos que mostraron el mayor registro de humedad en la lectura matutina fueron los días 18 y 19 de julio, donde se registró un porcentaje de 62 % de humedad, mientras que las lecturas más bajas se registraron los días 5 y 10 de abril con lecturas de 42 %; en la segunda lectura del día, el pico más alto de humedad se registró el día 26 de junio con una lectura de 61 %, mientras que

el pico más bajo de humedad se registró el día 05 de abril con una lectura de 21 % de humedad. Por otra parte, a pesar del incremento de la humedad ambiental, en la Figura 8b y c se puede observar la disminución total de humedades en los muros, después de la implementación de las bolsas con pómez.

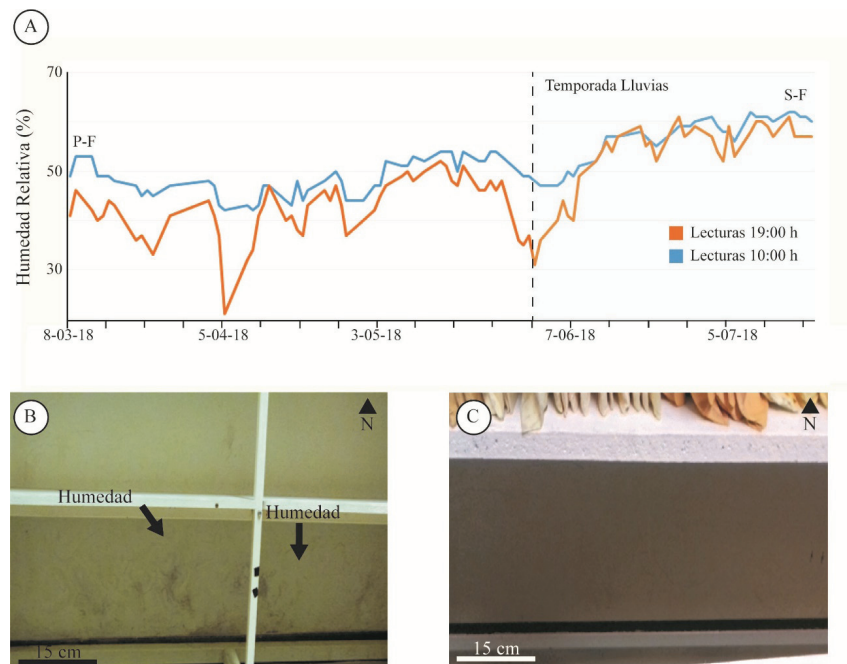


Figura 8. Lectura de humedad ambiental y fotografías de humedad en el muro norte: a) Lecturas semanales de humedad, b) Fotografía del muro norte donde se destaca la humedad del muro, c) Fotografía del muro norte al final del experimento. Nomenclatura: P-F, toma de primera fotografía, S-F, toma de segunda fotografía

CONCLUSIONES

P-HU muestra valores de ρ_r en el rango de rocas riolíticas. Sin embargo, ρ_b se encuentra en un rango $< 1\text{g/cm}^3$, menor a la densidad del agua. Estos valores implican una alta porosidad en las muestras. En este sentido, el análisis porcentual de poros muestra una alta interconectividad (70 %), que, además, es accesible al agua. Se resalta que la dinámica hídrica de la pómez está relacionada y acotada únicamente con la porosidad accesible al agua. De acuerdo con los resultados generales, las propiedades hídricas dependen o están vinculadas estrechamente con la distribución, el tamaño e interconexión de los poros. De acuerdo con la Figura 4, se observa que especímenes con una estructura porosa más compleja e interconectada tienden a ubicarse hacia la parte derecha superior de la gráfica.

Altos rangos en los valores de capilaridad están relacionados con el contenido de poros con dimensiones que van de 0.1 a 1000 μm . Valores altos de los coeficientes de capilaridad significan alta absorción. En este sentido, P-HU muestra una alta eficiencia en absorción de agua. De acuerdo con las gráficas de evaporación, si se comparan todas las muestras en conjunto se puede notar que P-HU tarda más tiempo en evaporar, en general, debido a las características y arquitectura del sistema poroso, como la distribución de tamaño de poro.

El reservorio del ASMH en el Palacio Federal de la Ciudad de Morelia manifiesta tres flujos importantes de humedad en los muros norte y este. Después de los

dos primeros meses de haber implementado el sistema de absorción se observó cualitativa y cuantitativamente que la humedad iba en decremento; sin registrar crecimiento de la zona afectada, y aún sin necesidad de utilizar medios mecánicos de extracción de humedad. A los dos meses de la colocación de la piedra pómez (P-HU) como captador, no se observaron mayores incrementos de humedad en los muros; incluso durante los meses de marzo, abril y mayo se registró un ligero decremento de la humedad absorbida, y fue hasta los meses de junio y julio (cuando inició el periodo de lluvias) que se manifestó nuevamente un ligero incremento de humedad.

Después de la implementación del método de bolsas con pómez, las zonas afectadas ya no cuentan con humedad perceptible a simple vista en la pared, como sucedió al inicio del experimento (Figura 8b y c); donde se mostraban grandes manchas de color oscuro en la pared, lo cual indica que la piedra pómez absorbe y concentra en su sistema poroso una gran cantidad de humedad emanada de la pared.

Las características petrofísicas de la roca pómez P-HU utilizada en este experimento permiten concluir que este es un buen material de absorción de agua en paredes con flujo de humedad, incluso se podría cubrir la parte inferior de paredes con este problema para que absorban esta humedad desde la base de las paredes y no permitir su ascenso; eso evitaría daños en muebles y archivos que se encuentren postrados en paredes. Esto como una medida práctica, económica e inmediata, antes de llevar a cabo una intervención mayor en inmue-

bles como el Palacio Federal de Morelia, considerados monumento histórico; que requieren un rigor de estudio y ejecución más complicado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores dedicamos este trabajo a la memoria de nuestro colega y amigo Fidel Cedillo-Rodríguez. Agradecemos su importante aporte, pero sobre todo, la oportunidad de caminar juntos un tramo de nuestras vidas (q.e.p.d.). †

REFERENCIAS

- Cortés, J. L., & Robles, J. (2018). Análisis del fenómeno de humedad en pared norte del Reservoirio del Archivo de la Sección de Monumentos Históricos. Centro INAH Michoacán (Antiguo Palacio Federal de Morelia). Informe técnico del 6 de febrero de 2018. Inédito.
- Ferriz, H., & Mahood, G. (1984). Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 89, 8511-8524.
- Gupta, V., & Sharma, R. (2012). Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya. *Engineering Geology*, 135-136, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.02.006>
- Havlíková, B., Katusčák, S., Petrovičová, M., Maková, A., & Brezová, V. (2009). A study of mechanical properties of papers exposed to various methods of accelerated ageing. Part I. The effect of heat and humidity on original wood-pulp papers. *Journal of Cultural Heritage*, 10(2), 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2008.07.009>
- López, R., Wedekind, W., Leiser, T., Molina, S., Velasco, A., Dohrmann, R., Kral, A., Wittenborn, A., Aguillón, A., & Siegesmund, S. (2016). Salt bursting tests on volcanic tuff rocks from Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4770-3>
- López, R., Cardona, N., & Wedekind, W. (2015). El rescate del patrimonio cultural pétreo de San Luis Potosí. *Universitarios Potosinos*, 194, 48.
- Martínez, J., Pola, A., García, L., Reyes Agustin, G., Osorio, L. S., Macías, J. L., & Robles, J. (2018). Building stones used in the architectural heritage of Morelia (México): Quarries location, rock durability and stone compatibility in the monument. *Environmental Earth Sciences*, 77(5), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7340-7>
- Navelot, V., Géraud, Y., Favier, A., Diraison, M., Corsini, M., Lardeaux, J. M., Verati, C., Mercier de Lépinay, J., Legendre, L., & Beauchamps, G. (2018). Petrophysical properties of volcanic rocks and impacts of hydrothermal alteration in the Guadeloupe Archipelago (West Indies). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 360, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.07.004>
- Padoan, R., Steemers, T., Klein, M., & Aalderink, B. (2008). Quantitative hyperspectral imaging of historical documents: Technique and application. *ART Proceedings*, May, 25-30. <http://www.ndt.net/article/art2008/papers/097Padoan.pdf>
- Pola, A., Crosta, G., Fusi, N., Barberini, V., & Norini, G. (2012). Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks. *Tectonophysics*, 566-567. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.017>
- Pola, A., Martínez, J., Macías, J. L., Fusi, N., Crosta, G., Garduño, V. H., & Núñez, J. A. (2016). Geomechanical characterization of the Miocene Cuitzeo ignimbrites, Michoacán, Central Mexico. *Engineering Geology*, 214, 79-93. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.10.003>
- Rangel, E., Arce, J. L., & Macías, J. L. (2018). Storage conditions of the ~29 ka rhyolitic Guangoche White Pumice Sequence, Los Azufres Volcanic Field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 132-148. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.016>
- Rojas, T. I., Aira, M. J., Batista, A., Cruz, I. L., & González, S. (2012). Fungal biodeterioration in historic buildings of Havana (Cuba). *Grana*, 51(1), 44-51. <https://doi.org/10.1080/00173134.2011.643920>
- Sereno, H. I. (2020). *Petrología del corpus y módulo estructural del monumento histórico: Centro Cultural Universitario UNAM, Morelia* (Tesis de Maestría del Posgrado en Ciencias de la Tierra), ENES Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Torres, I. (2020). *Caracterización, física, hídrica y mecánica de un depósito de flujo piroclástico enriquecido en pómez del volcán el Chichonal, Chiapas* (Tesis de Licenciatura), ENES Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vargas, J. A. (2020). Intervención en un edificio histórico como fuente para su historia: De exconvento de Santa Catalina de Sena a palacio Federal, Morelia, Michoacán. En: Catherine, R. E., Mercado-López E., Torres-Vega J. M. (Coords.). *Historia de la arquitectura en Michoacán. Una mirada desde las fuentes*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (2020), 27-46. ISBN:978-607-542-163-6 electrónico.

Cómo citar:

Robles-Camacho, J., Sereno-Villaseñor, H. I., Cortés-Esquivel, J. L., González-Garrido, R. M. A., Pola-Villaseñor, A., & Cedillo-Rodríguez, F. † (2022). Eficiencia de la Piedra Pómez (P-HU) como absorbente de humedad capilar para la salvaguarda de acervos documentales. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 23 (04), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.4.032>