Caracterización multianalítica de suelos de Liberia (Guanacaste) para su uso potencial como material constructivo

Multianalytical characterization of soils from Liberia (Guanacaste) for their potential use as a construction material

Merylin Seas-Jiménez[1], Adrián Quesada-Martínez[2], Dominique Chang-Albizurez[3]

Fecha de recepción: 9 de diciembre, 2025
Fecha de aprobación: 17 de abril, 2026

Seas-Jiménez, M; Quesada-Martínez, A; Chang-Albizurez, D. Caracterización multianalítica de suelos de Liberia (Guanacaste) para su uso potencial como material constructivo. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 143-159.

https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8381

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
mer.seasj@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-7924-971X
2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
adquesada@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-5975-4195
3 Escuela de Arquitectura y Urbanismo. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
dchang@itcr.ac.cr
https://orcid.org/0000-0002-9813-2006

Palabras clave

Medición; Suelo; Temperatura; Mineral; Material.

Resumen

Este estudio presenta una caracterización multianalítica de suelos de la región de Liberia, Guanacaste, con el fin de evaluar su idoneidad como material de construcción en sistemas de cerramiento tradicionales. Se emplearon tres técnicas complementarias: fluorescencia de rayos X (XRF), difracción de rayos X (XRD) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), con el objetivo de conocer la composición química, mineralógica y el comportamiento térmico del material. Los resultados obtenidos evidencian que las tierras de Liberia están compuestas principalmente por dióxido de silicio (SiO_2), así como cantidades intermedias de Al_2O_3 y Fe_2O_3, lo cual es característico de los suelos volcánicos y está en línea con los materiales que se han utilizado para la construcción con tierra a lo largo de la historia. Se confirmó la presencia de fases feldespáticas altamente cristalinas y cuarzo, indicando estructuras estables, no expansivas y resistentes a los ciclos de humedad-sequedad, así como valores de calor específico necesarios para simulaciones higrotérmicas. La caracterización, muestra que estos suelos tienen propiedades térmicas, mineralógicas y químicas adecuadas para su empleo constructivo, resaltando sus posibilidades como material estable, sostenible y de valor cultural en el marco arquitectónico de Liberia.

Keywords

Measurement; Soil; Temperature; Mineral; Material.

Abstract

This study presents a multianalytical characterization of soils from the region of Liberia, Guanacaste, with the aim of assessing their suitability as a construction material for traditional earthen wall systems. Three complementary techniques were employed X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and differential scanning calorimetry (DSC)to determine the chemical composition, mineralogical phases, and thermal behavior of the material. The results show that the soils from Liberia are primarily composed of silicon dioxide (SiO_2), along with intermediate proportions of Al_2O_3 and Fe_2O_3, a composition typical of volcanic soils and consistent with materials historically used in earthen construction. The presence of highly crystalline feldspathic phases and quartz was confirmed, indicating stable, non-expansive structures resistant to moisture–drying cycles, as well as specific heat capacity values required for hygrothermal simulations. Overall, the characterization demonstrates that these soils possess suitable thermal, mineralogical, and chemical properties for constructive use, highlighting their potential as a sustainable and technically viable material within traditional architectural systems.

Introducción

La tierra ha sido históricamente uno de los materiales más empleados en la construcción, destacando por su disponibilidad, bajo costo y sostenibilidad ambiental. En zonas como Guanacaste, Costa Rica, este recurso sigue siendo importante no solo por su fuerte arraigo en los sistemas de construcción tradicionales, sino también por el potencial de adaptarse a los estándares actuales sostenibilidad de la ingeniería y la arquitectura.

A pesar de este valor histórico y constructivo, en Costa Rica los sistemas en tierra han sido tradicionalmente percibidos como técnicas poco confiables o asociadas a edificaciones de baja calidad. Esta visión responde, en parte, a la escasa preservación del patrimonio construido en tierra, las afectaciones causadas por eventos sísmicos, la deficiente aplicación de técnicas constructivas por falta de mano de obra calificada, la sustitución de obras antiguas, por el afán de modernizar y la transmisión generacional de vacíos en las técnicas de construcción [1].

A nivel internacional, la arquitectura en tierra ha experimentado un renovado interés debido a su estrecha relación con los principios de sostenibilidad y adaptación al cambio climático. Diversos estudios señalan que la tierra cruda constituye un material de construcción que reduce el consumo de energía, es respetuoso con el medio ambiente y proporciona un clima interior saludable y confortable. Este resurgimiento también se refleja en la amplia presencia histórica y contemporánea de construcciones en tierra en regiones como Francia, España, Portugal, el Magreb, México, Perú, Brasil y China, donde su transmisión artesanal ha permitido preservar conocimientos empíricos sobre sus propiedades higrotérmicas y mecánicas [2], [26]. Otra de las razones por las que la tierra es elegida como material de construcción para los cerramientos es su inercia térmica. La inercia térmica es la resistencia que presenta todo cuerpo a variar su temperatura, acumulando en su interior la energía térmica que reciben. La variable que expresa esta propiedad en los materiales es la difusividad térmica y depende del coeficiente de conductividad térmica, el calor específico y la densidad [3].

Estudiar la tierra mediante técnicas de caracterización nos ayuda a evaluar su idoneidad como material de construcción, ya que permite conocer su composición y comportamiento mecánico. Por esta razón se requiere la combinación de diferentes técnicas de caracterización que permitan analizar tanto su composición química como su estructura cristalina y su comportamiento térmico.

La primera de ella es la fluorescencia de rayos X (XRF), la cual es una técnica de análisis elemental ampliamente utilizada en diversas disciplinas, como la geología, la industria, la investigación científica y el control de calidad. Su importancia radica en su capacidad para identificar y cuantificar los elementos presentes en una muestra de forma no destructiva y precisa, lo que la convierte en una herramienta esencial para estudiar la composición de materiales en diferentes estados: sólidos, líquidos o polvos [4].

Los resultados obtenidos mediante XRF consisten en un espectro que muestra la intensidad de los rayos X emitidos por los elementos presentes en la muestra. A partir de estos espectros, se puede identificar qué elementos están presentes y en qué concentración, proporcionando una imagen clara y cuantitativa de la composición del material [5].

De manera complementaria, se realizaron pruebas de difracción de rayos X (XRD), donde en un difractómetro, las diferentes fases cristalinas de un material muestran diferentes patrones de difracción, cuya identificación se puede realizar comparando los patrones ya obtenidos de muestras desconocidas con los patrones de bases de datos de referencia. Esto con el fin de obtener y analizar información de la composición química, la estructura cristalina, el tamaño de los cristales, la deformación de redes, la orientación preferida y el espesor de las capas de una amplia gama de materiales, desde polvos hasta sólidos, películas finas y líquidos [6].

Finalmente, la calorimetría diferencial de barrido (DSC), la cual destaca como una de las más utilizadas, dado que permite estudiar procesos asociados a variaciones de entalpía, incluyendo transiciones de primer y segundo orden [7]. Además de información importante de cuando aumenta o disminuye la temperatura y como la muestra se somete a una transformación física y si será necesario fluir más o menos calor hacia ella que hacia la referencia para mantener

ambas a la misma temperatura. Es decir, el DSC nos da información de los cambios de entalpía en las muestras debido a cambios en su estado físico y propiedades químicas en función de la temperatura o el tiempo [8]

Esta caracterización forma parte del proyecto de investigación “La incidencia del uso de la tierra de la Ciudad de Liberia como material constructivo en el desempeño higrotérmico de los espacios internos mediante técnicas de simulación” desarrollado de manera conjunta por las escuelas de Arquitectura y Urbanismo, Agronomía, y Ciencia e ingeniería de los materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en cooperación con la Asociación para la Cultura de Liberia. Los datos obtenidos son requeridos para poder alimentar el software de simulación higrotérmica.

Materiales y métodos (metodología)

Para este estudio se contó con tres tipos de muestra de suelos diferentes recolectados en la ciudad de Liberia, Guanacaste.

- La Muestra #1: Recolectada de una pared de una de las casas construidas con bahareque que se ubicaban en el centro de la ciudad de Liberia.
- La Muestra #2: Recolectada directamente del suelo en un lote al lado de la carretera que lleva al volcán Rincón de la Vieja, que es el material empleado en la restauración de los inmuebles patrimoniales.
- La Muestra #3: Recolectada de una de las paredes de bahareque la Casa de la Cultura o Museo del Sabanero, declarada Patrimonio Histórico Cultural de Costa Rica, previo al proceso de restauración.

Fluorescencia de rayos x (XRF)

Para el análisis, se pulverizaron las muestras en un pulverizador de anillos hasta la malla número 325 y se compactaron para que la muestra fuera mayormente homogénea. De igual manera, durante todas las pruebas, para que la muestra de análisis fuera representativa se utiliza un cuarteador de Jones. Además, la norma ASTM E1621 describe la guía general para el análisis elemental de materiales mediante fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda.

Difracción de rayos X (XRD)

El escaneo se realizó en un rango angular de 2θ que va desde 10.0064° hasta 84.9904°, lo que permite obtener información sobre la estructura cristalina de cada muestra.

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un difractómetro modelo EMPYREAN, configurado con una geometría Theta/Theta. La fuente de rayos X empleó un ánodo de cobre (Cu), con longitudes de onda características de Kα1 = 1.54060 Å, Kα2 = 1.54443 Å y Kβ = 1.39225 Å. El generador de rayos X operó a una tensión de 45 kV y una corriente de 40 mA. El detector funcionó en modo de escaneo utilizando un Detector de Posición Sensible (PSD), y no se empleó monocromador durante la medición. Se utilizó una rendija de divergencia fija de 0.4354° y la rotación de la muestra (spinning) estuvo activada para mejorar la representatividad de la medición.

En cuanto a los parámetros de medición, el análisis se realizó en un modo de escaneo continuo, con un tamaño de paso angular de 0.0130° y un tiempo de adquisición por paso de 37.995 segundos. Las mediciones se efectuaron a temperatura ambiente, aproximadamente 25 °C.

Respecto a las condiciones de la muestra, se utilizó un montaje en configuración Reflection-Transmission Spinner. La longitud irradiada de la muestra fue de 10 mm, y esta se preparó en forma de polvo compacto.

Diferencial de barrido (DSC)

Se siguió la norma ASTM 1269 para calcular el calor específico por medio de la técnica DSC, para esto se realizó el estudio a una cápsula vacía, a una referencia que en este caso fue platino y a las 3 muestras con los siguientes pasos:

- Rampa hasta 0 °C con un paso de 20 °C/min.
- Isoterma en 0 °C durante 4 min.
- Rampa de 0 °C hasta 400 °C con un paso de 20 °C/min.
- Isoterma en 400 °C durante 4 min.

Posterior a esto se realizaron los cálculos para obtener el calor específico de las tierras, donde C_{pref} es el calor específico del platino, $D_{muestra}$ es la distancia de la curva DSC entre la cápsula vacía y la muestra para una temperatura específica y D_{ref} es la distancia de la curva DSC entre la cápsula vacía y la referencia de platino para una temperatura específica.

Resultados

Resultado de fluorescencia de rayos x

Análisis de datos de fluorescencia de rayos x

Un estudio preliminar indica que la composición química de los materiales en tierra está dominada por el dióxido de silicio (SiO_2), lo que lo convierte en el componente principal en arcillas y suelos destinados a construcción. Le siguen el óxido de aluminio (Al_2O_3), el óxido de hierro (Fe_2O_3) y, en menor proporción, el óxido de calcio (CaO). Estos cuatro compuestos son relevantes porque influyen directamente en la estabilidad estructural, la resistencia térmica y mecánica, la durabilidad frente al desgaste y la capacidad de cohesión del material. Por ello, constituyen la base para interpretar los porcentajes obtenidos mediante fluorescencia de rayos X y valorar el potencial constructivo de la tierra analizada [9].

Tabla 1. Análisis cuantitativo de los componentes presentes en las tres muestras recolectada en la Casa de Liberia.

Componente	Muestra 1 (%)	Muestra 2 (%)	Muestra 3 (%)
SiO_2	62.87	59.03	68.15
$AlcO_3$	11.58	16.94	13.53
Fe_2O_3	12.18	14.80	10.80
K_2O	7.39	3.45	3.82
CaO	3.56	2.65	2.14
TiO_2	1.02	1.19	1.01
MnO	0.72	0.31	0.22
ZrO_2	0.07	0.07	0.05

Se observa que la suma de los óxidos cuantificados por XRF no alcanza el 100% en ninguna de las tres muestras (entre 98.4% y 99.7%). Este remanente es atribuible a componentes que la técnica de XRF no cuantifica directamente, principalmente materia orgánica, agua estructural

y otros compuestos volátiles, cuya determinación requeriría un ensayo complementario de perdida por calcinación (LOI, por sus siglas en inglés), el cual no fue realizado en el marco de este estudio. Se recomienda incorporar esta determinación en trabajos futuros para cerrar completamente el balance de masa.

Muestra #1 – Casa Liberia

En la tabla 1, columna 1 correspondiente a los resultados obtenidos para la primera muestra de tierra (muro o pared) tomada en La Casa de Liberia. En esta muestra destaca el alto porcentaje de dióxido de silicio (SiO2), que corresponde a un 62.87%. Este compuesto, también conocido como sílice, es un componente clave en muchos tipos de suelo, especialmente en arenas y rocas. De acuerdo con las literaturas consultadas, el SiO_2 suele ser el óxido mayoritario en materiales a base de tierra utilizados en construcción, situándose como el componente predominante en arcillas y suelos empleados para muros y cerramientos [3], [9], [10], [11], [27], [28]. Su alta presencia aporta estabilidad, baja expansividad y resistencia a la intemperización, cualidades relevantes cuando la tierra se utiliza únicamente como pared o cerramiento y no como elemento estructural, especialmente en edificaciones donde la estructura portante es de madera, tal como se documenta en sistemas mixtos tierra-madera [11].

También, la sílice es muy resistente a la intemperización y a los procesos de erosión química. Esto contribuye a la durabilidad y su capacidad de mantener sus propiedades físicas y mecánicas a largo plazo, además, no son expansivos. Esto significa que no se expanden ni se contraen significativamente con cambios en la humedad, lo cual es ideal para evitar problemas como el agrietamiento de estructuras o asentamientos diferenciales en los cimientos [9].

Para el caso de la concentración de óxido de aluminio, esta es moderada, lo que sugiere una presencia significativa de minerales aluminosos, posiblemente micas o feldespatos y contribuye a la cohesión interna y al comportamiento térmico del material, aspectos señalados en estudios previos sobre tierras para construcción y en la literatura asociada a minerales aluminosos [12], [9], [11]. El óxido de hierro (Fe_2O_3), con un 12.18%, se encuentra dentro de los rangos observados en arcillas destinadas a muros y ladrillos, influyendo tanto en la coloración como en la durabilidad frente al desgaste, lo cual coincide con su descripción como hierro no silícico presente en forma de óxidos libres [12], [9], [11].

El contenido de óxido de potasio (K_2O) en la muestra fue de 7.39%, lo cual indica una cantidad importante de potasio total en el suelo. Los minerales ilítico, comúnmente presentes en suelos meteorizados, retienen el potasio entre sus capas cristalinas, lo que impide su liberación fácil a la solución del suelo. En este sentido, aunque el K esté presente en cantidad significativa, gran parte de él podría encontrarse en formas no intercambiables o estructurales, especialmente si se ha fijado en minerales como la ilita o atrapado en zonas con condiciones de contracción-expansión como en las esmectitas [13],[14].

El contenido de óxido de calcio (CaO) en la muestra de tierra fue de 3.56%. En suelos tropicales intensamente meteorizados, como los de la región de Guanacaste, es común que los carbonatos se disuelvan por lixiviación, por lo que esta concentración podría reflejar zonas menos alteradas o aportes mineralógicos secundarios. Es relevante mencionar que, según la literatura, suelos con bajo contenido de CaO como este (<4%) pueden favorecer, bajo tratamientos térmicos, la formación de fases como la hematita, un óxido de hierro antiferromagnético característico de ambientes altamente meteorizado [15].

El contenido de óxido de manganeso (MnO) en la muestra de suelo fue de 0.72%, equivalente a aproximadamente 5,600 mg/kg de manganeso total. Para los niveles típicos de manganeso en suelos no contaminados varían entre 40 y 900 mg/kg. Por tanto, el valor encontrado en esta muestra supera ampliamente ese rango, lo que podría estar relacionado con un origen

volcánico o mineralógico particular del sitio y se encuentra usualmente en forma de óxidos como la pirolusita (MnO_2), carbonatos o silicatos [16]. Por último, la baja cantidad de óxido de titanio indica una baja pero notable presencia de minerales como ilmenita o rutilo [17].

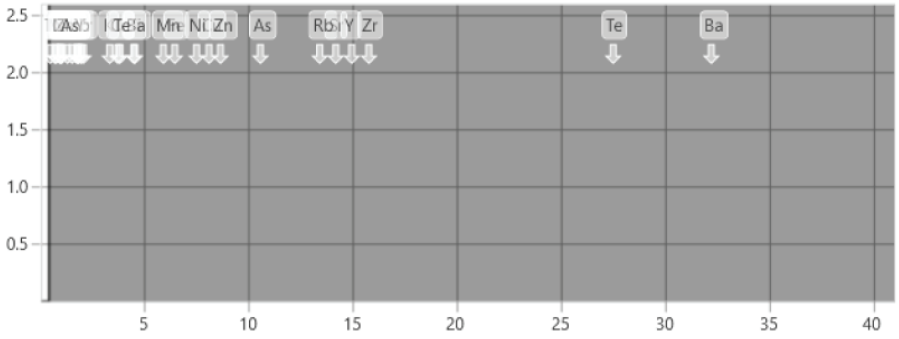

Figura 1. Diagrama de concentración relativa de elementos traza para la muestra 1.

Muestra #2 – Carretera al volcán

Esta muestra destaca por tener el mayor porcentaje de óxido de aluminio (Al_2O_3), el cual es un componente importante en arcillas y contribuye directamente a la cohesión interna del material, su estabilidad térmica y su capacidad de mantener su integridad en ciclos de humedad-sequedad [9],[10],[18]. En el contexto de esta investigación, una mayor proporción de alúmina puede favorecer el desempeño de la tierra cuando se emplea como pared o cerramiento no portante, ya que incrementa su cohesión y su resistencia a la deformación sin requerir propiedades mecánicas propias de elementos estructurales.

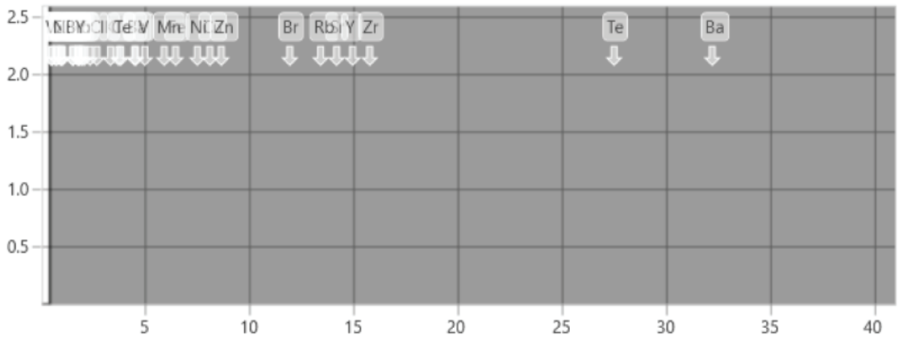

Figura 2. Diagrama de concentración relativa de elementos traza para la muestra 2.

Por otro lado, esta muestra fue obtenida en la zona más cercana a un volcán, lo que refleja ligeramente una mayor concentración de minerales relacionados con ambientes volcánicos, como el Fe_2O_3 (óxido de hierro) y el TiO_2 (óxido de titanio) en comparación con las otras muestras [19].

En cuanto al óxido de potasio (K_2O), su valor más bajo (3.45%) podría estar relacionado con la variabilidad mineralógica entre sitios de muestreo, ya que los minerales ilíticos o arcillosos típicos de ambientes volcánicos pueden fijar el potasio de manera más estable en su estructura [13]. Para el caso de óxido de calcio (CaO) y óxido de manganeso (MnO) no difieren mucho de los anteriores.

Con respecto al contenido de zirconio (Zr), este permanece prácticamente constante en comparación con las otras muestras, lo que indica que no hay una variación significativa en este componente mineral. Por otro lado, aunque el dióxido de silicio (SiO_2) sigue siendo el componente predominante, su concentración es ligeramente menor que en la Muestra 1. Esta diferencia podría estar asociada a una mayor diversidad mineralógica en la Muestra 2, posiblemente influenciada por el entorno volcánico del sitio de recolección. A diferencia de la muestra 1, en esta muestra se detectaron elementos típicamente asociados a procesos volcánicos, como azufre (S), cloro (Cl), vanadio (V) y bromo (Br), aunque en concentraciones bajas o cercanas al límite de detección.

Muestra #3 – Casa de la Cultura

La composición química de esta muestra es similar a la de las muestras anteriores, destacando nuevamente el elevado contenido de dióxido de silicio (SiO_2), adecuado para materiales de cerramiento debido a su estabilidad y baja expansividad [9]. Aunque esta muestra proviene de un material previamente mezclado y no a un suelo natural sus valores de SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3 permanecen dentro de los rangos reportados para tierras utilizadas en muros no portantes [10], [11]. Estos factores pueden ser favorables para el uso de este tipo de suelo en aplicaciones constructivas, ya que la sílice tiene una baja expansividad y es resistente a la intemperización [9].

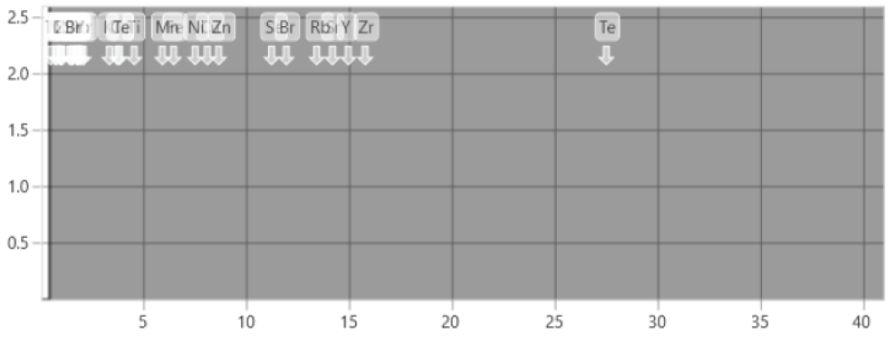

Figura 3. Diagrama de concentración relativa de elementos traza para la muestra 3.

Por otro lado, el Al_2O_3, presente en un nivel moderado, sugiere la presencia de minerales aluminosos que podrían contribuir a la capacidad de retención de agua y nutrientes en el suelo [12][18]. El Fe_2O_3, aunque en menor concentración, indica la presencia de minerales ferrosos que podrían aportar coloración y estabilidad química [13].

El bajo porcentaje de TiO_2 podría indicar una pequeña presencia de minerales titaníferos como rutilo o ilmenita [17], mientras que el ZrO_2 refleja la presencia de circón, aunque en cantidades mínimas, igual que las otras muestras. Para el caso de óxido de calcio (CaO), óxido de potasio(K_2O) y óxido de manganeso (MnO) no difieren mucho con la muestra 2.

Por último, a diferencia de las otras muestras esta presentó un porcentaje de selenio en una concentración de 0.0140 wt% lo cual es relativamente bajo, pero esto puede estar relacionado con la influencia de procesos volcánicos en la región. En estudios anteriores se ha observado que la deposición de selenio en suelos cercanos a volcanes activos puede estar vinculada a la emisión de gases volcánicos [20].

Resultados de calor Específico

Tabla 2. Valores de calor específico (Cp) obtenidos por DSC a diferentes temperaturas para las muestras M1, M2 y M3, y su promedio en el rango 25–375 °C.

Temperatura (°C)	Cp M1 J/(g·K)	Cp M2 J/(g·K)	Cp M3 J/(g·K)
25	0.694	0.738	0.720
50	0.868	0.904	0.921
75	1.000	1.198	1.249
100	0.946	1.169	1.092
125	0.836	0.922	0.859
150	0.778	0.836	0.788
175	0.760	0.797	0.762
200	0.789	0.798	0.792
225	0.775	0.803	0.763
250	0.960	0.904	0.902
275	0.987	1.375	1.439
300	0.775	0.875	0.821
325	0.764	0.846	0.788
350	0.777	0.834	0.795
375	0.830	0.889	0.858
Promedio	0.836	0.926	0.903

Muestra #1

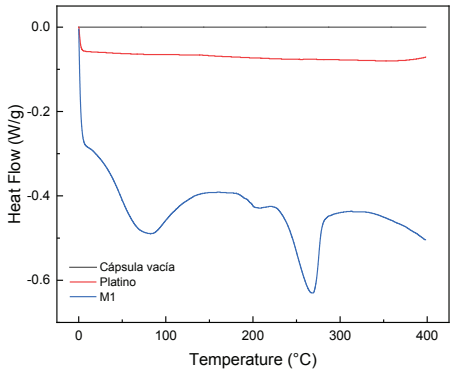

Figura 4. Curva DSC para obtener el calor específico de la muestra M1.

Inicialmente, es importante destacar que el proceso observado es de naturaleza endotérmica, ya que implica la absorción de calor por parte de la muestra a medida que se incrementa la temperatura. En una curva DSC, este comportamiento se representa mediante valores negativos en el eje de flujo de calor (W/g), lo cual indica que el sistema requiere energía para que ocurra una determinada transición térmica. Estos eventos se manifiestan como picos descendentes en la gráfica, característicos de los procesos endotérmicos en el análisis térmico diferencial [21].

En la curva correspondiente a la muestra M1 (Figura 4), se observa un pico endotérmico pronunciado antes de los 100 °C, atribuible a la deshidratación física del suelo, específicamente a la pérdida de agua intersticial o de adsorción. Este tipo de agua puede dividirse en fuertemente unida (agua higroscópica) y débilmente unida (capa de humedad), siendo esta última la que se pierde por debajo de los 100 °C, como ocurre en este caso [22].

Asimismo, se identifica un segundo pico notable alrededor de los 275 °C, con una absorción aproximada de -0.6 W/g. Este comportamiento refleja una alta demanda energética, probablemente asociada a la descomposición de materia orgánica presente en el suelo, como residuos vegetales o compuestos de bajo peso molecular [21]. Estos procesos no solo involucran la absorción de calor, sino que también suelen acompañarse de una pérdida de masa atribuida a la liberación de agua en sus diferentes formas: humedad superficial, agua de cristalización o agua estructural [22].

Este mismo pico también puede estar relacionado con la deshidratación de minerales, incluyendo agua adsorbida y agua de enlace asociada a cationes entre los planos estructurales. En particular, en minerales como los hidróxidos de hierro, por ejemplo, la goetita, se han reportado picos endotérmicos entre los 290 °C y 330 °C debido a procesos de deshidroxilación (α–FeOOH → α–Fe_2O_3 + H_2O). La posible superposición de estos eventos térmicos puede generar interferencias que dificultan el análisis cuantitativo de los patrones obtenidos mediante DSC [22]

Muestra 2 y 3

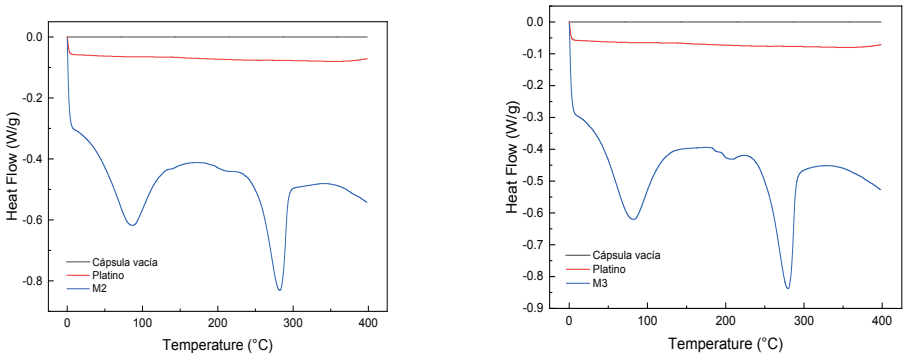

Figura 5. Curva DSC para obtener el calor específico de la muestra M2 (A) vs M3 (B).

Las curvas DSC de las muestras M2 y M3 presentan perfiles térmicos similares entre sí y también con respecto a la muestra M1, lo que sugiere una composición general comparable. Ambas muestran un pico endotérmico bien definido por debajo de los 100 °C, atribuible a la pérdida de agua superficial o humedad físicamente adsorbida, lo cual es consistente con fenómenos de deshidratación inicial reportados [24]. Esta etapa representa una deshidratación física sin transformación estructural. En el rango entre 100 °C y 200 °C no se observan eventos térmicos relevantes, lo que indica una baja presencia de agua de coordinación en estas muestras [23].

El evento térmico más destacado se presenta entre los 250 °C y 300 °C, donde ambas muestras muestran un pico endotérmico profundo, con valores cercanos a -0.85 W/g en el caso de M3. Este comportamiento es compatible con procesos de descomposición de materia orgánica o reacciones de transformación de fases menores presentes en el suelo.

Análisis XRD – Muestra 1

A partir de la comparación con bases de datos de referencia, se identificaron las siguientes fases cristalinas:

- 00-010-0361: Potassium Sodium Aluminum Silicate — $Na_{0.71}K_{0.29}AlSi_3O_8$
- 01-075-1634: Sodium Potassium Aluminum Silicate — $(Na_{0.85}K_{0.14})(AlSi_3O_8)$
- 01-075-1631: Sodium Potassium Aluminum Silicate — $(Na_{0.667}K_{0.333})(AlSi_3O_8)$

Las tres fases corresponden a aluminosilicatos del grupo de los feldespatos alcalinos, típicos en materiales geológicos de origen ígneo.

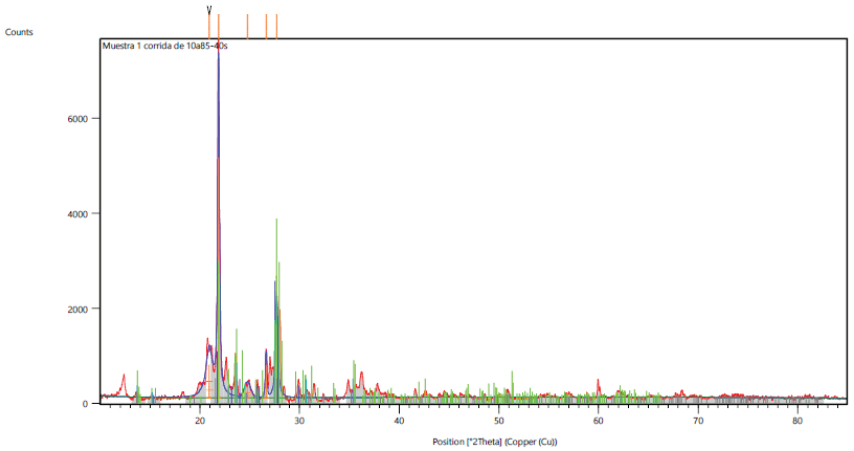

Figura 6. Difractograma de muestra 1.

Patrones de difracción

Tabla 3. Picos principales observados en el difractograma de muestra 1.

Posición (°2θ)	Intensidad Relativa (%)	d-spacing (Å)
21.8511	100.00	4.06419
21.9061	50.00	4.06419
27.6763	30.30	3.22058
27.7465	15.15	3.22058

Estos picos representan las zonas con mayor intensidad de difracción, lo cual indica planos cristalográficos con alta densidad atómica en la muestra.

Análisis de Resultados

El difractograma de la Muestra 1 revela un alto grado de cristalinidad, lo que se nota a través de picos simétricos, estrechos e intensos. Esto señala una estructura mineral bien ordenada y un material con poca meteorización. El plano cristalográfico típico (201)/(–201) del sistema feldespático (Na,K)$AlSi_3O_8$, que se encuentra en 21.8511° (2θ) con un d-spacing de 4.064 Å, es el pico principal. Este plano es uno de los más representativos dentro de los feldespatos alcalinos y su intensidad confirma que esta fase domina la mineralogía de la muestra [24]. La

presencia de picos duplicados cercanos (como en 21.8511° y 21.9061°) sugiere variaciones composicionales o estructurales menores dentro del mismo grupo cristalino, o la coexistencia de fases muy similares estructuralmente.

Adicionalmente, los picos ubicados alrededor de 27.6–27.7° (d ≈ 3.220 Å) coinciden con el plano (002), que es un rasgo distintivo de los feldespatos sódico-potásicos [24]. La existencia de estos planos señala una red tridimensional no expansiva, rígida y estable, lo cual es particularmente significativo en los materiales utilizados para la arquitectura de tierra. Esto se debe a que disminuye la propensión a deformaciones debido a alteraciones higrométricas y favorece la longevidad del muro.

Al tratarse de un material constituido por fases no expansivas, estables y resistentes a la meteorización, la tierra utilizada en la construcción original posee cualidades fundamentales para la conservación de muros de bahareque, permitiendo que mantengan su integridad estructural ante ciclos de humedad-sequedad propios del clima cálido de Liberia, ya que estos resultados son consistentes con materiales utilizados en aplicaciones cerámicas, geotécnicas o como indicadores de alteración mineralógica en estudios de suelos.

Cabe señalar que la condición de estabilidad y baja expansividad descrita responde principalmente al predominio de feldespatos alcalinos y cuarzo, fases mineralógicamente estables idénticas por XRD. Sin embargo, esto no implica una ausencia total de minerales arcillosos en el material. En los sistemas de bahareque, la fracción arcillosa, aunque minoritaria frente a las fases feldespáticas y cuarzosas, cumple un papel distinto y complementario: actúa como aglutinante, otorgando la plasticidad y cohesión necesarias para adherir la tierra a la estructura de caña o madera durante la aplicación húmeda y para mantener la integridad del repello una vez seco. Es precisamente el balance entre una matriz mayoritariamente no expansiva (que limita el agrietamiento por ciclos de humedad – sequedad) y una fracción arcillosa suficiente (que aporta cohesión y trabajabilidad) lo que explica el buen desempeño histórico de estas tierras como material de cerramiento en la región.

Análisis XRD – Muestra 2

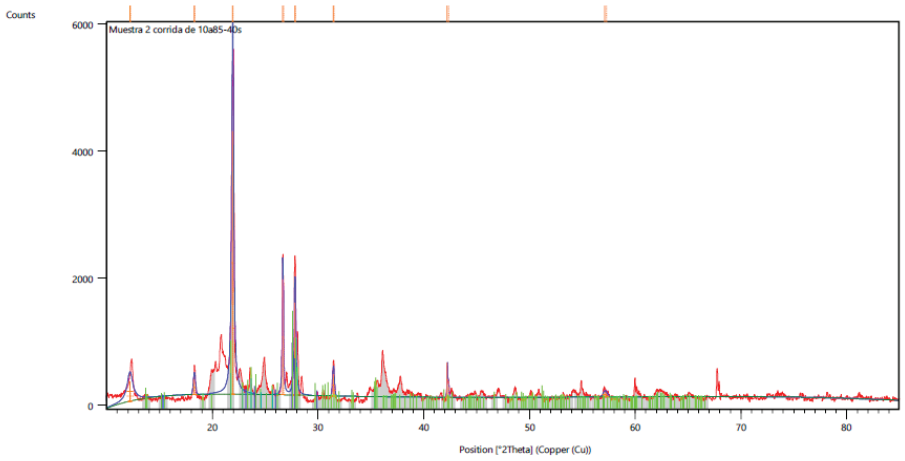

Figura 7. Difractograma de muestra 2.

Patrones de difracción

Tabla 4. Picos principales observados en el difractograma de muestra 2.

Posición (°2θ)	Intensidad Relativa (%)	d-spacing (Å)
21.911	100.00	4.05325
21.966	50.00	4.05325
26.6492	43.82	3.34233
27.8084	35.03	3.20558

Análisis de fases

Las fases cristalinas identificadas con mayor probabilidad en la muestra son:

- 00-010-0361: Potassium Sodium Aluminum Silicate — $Na_{0.71}K_{0.29}AlSi_3O_8$
- 01-075-1632: Sodium Potassium Aluminum Silicate — $(Na_{0.75}K_{0.25})(AlSi_3O_8)$

Ambas corresponden a feldespatos alcalinos, minerales comunes en matrices geológicas y suelos de origen ígneo o metamórfico.

Análisis de Resultados

El difractograma de la muestra 2 evidencia una estructura cristalina bien definida, como lo indican los picos estrechos y simétricos, con intensidades altas. El pico más intenso aparece en 21.911° (2θ) con una intensidad relativa del 100%, seguido de varios picos secundarios que conservan el mismo valor de *d-spacing*, acompañado por un pico cercano en 21.966°, lo cual indica ligeras variaciones composicionales dentro de la misma fase feldespática asociadas a sustituciones Na^+/K^+ en el sistema $(Na,K)AlSi_3O_8$. La presencia de varios picos secundarios definidos, aun cuando corresponden a fases cristalinas similares, sugiere que el material del suelo conserva un grado de heterogeneidad natural mayor que el observado en la Muestra 1, aspecto esperable en depósitos sin intervención constructiva.

Adicionalmente, el difractograma muestra un pico claro en 26.649° (2θ) (d = 3.342 Å). El pico característico del cuarzo α, de acuerdo con la bibliografía mineralógica, se encuentra exactamente en 26.6° (plano (101)), lo cual significa que este valor es completamente congruente con el comportamiento anticipado de esta fase [25]. La presencia de cuarzo libre como elemento adicional es consistente con suelos que provienen de materiales volcánicos e ígneos, y es la principal diferencia con respecto a la Muestra 1, en la cual esta fase es menos notoria.

Análisis XRD - Muestra 3

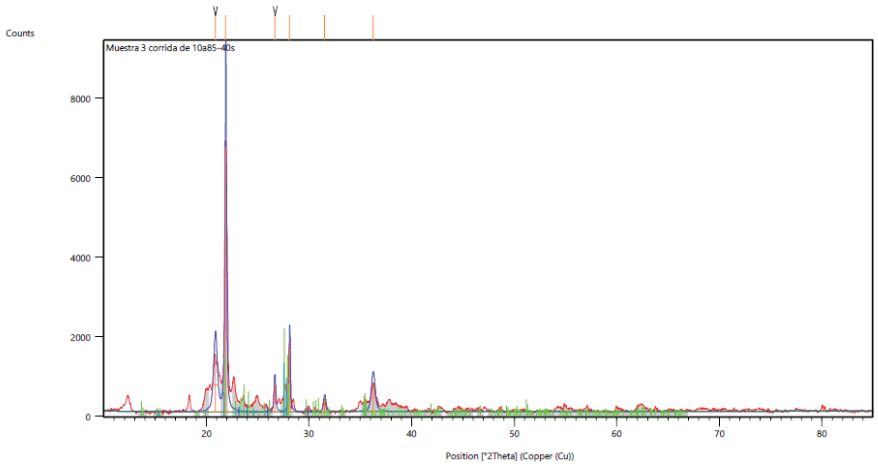

Figura 8. Difractograma de muestra 3.

Análisis de fases

Las fases identificadas a partir de la base de datos son:

- 00-010-0361: Potassium Sodium Aluminum Silicate — $Na_{0.71}K_{0.29}AlSi_3O_8$
- 01-075-1632: Sodium Potassium Aluminum Silicate — $(Na_{0.75}K_{0.25})(AlSi_3O_8)$

Ambas corresponden a aluminosilicatos alcalinos, típicos de matrices minerales naturales como feldespatos.

Patrones de difracción

Tabla 5. Picos principales observados en el difractograma de muestra 3.

Posición (°2θ)	Intensidad Relativa (%)	d-spacing (Å)
21.8754	100.00	4.06309
28.0927	25.10	3.17642
20.8746	20.17	4.25557
36.2381	10.48	2.47896

El pico más intenso a 21.8754° coincide con planos altamente ordenados, comúnmente asociados con minerales feldespáticos.

Análisis de Resultados

Este patrón de difracción muestra una distribución clara de picos con intensidades bien definidas, indicando una estructura cristalina dominante. El pico más intenso se encuentra en 21.8754° (2θ) con un *d-spacing* de 4.06309 Å, reflejando una fase cristalina bien organizada y probablemente predominante en la muestra.

La composición mineralógica está dominada por aluminosilicatos de sodio y potasio, lo que coincide con la presencia de feldespatos alcalinos. Estos compuestos son característicos de suelos derivados de rocas ígneas o metamórficas, y su presencia sugiere una fuerte componente geológica en el origen de la muestra.

A diferencia de la Muestra 2, donde el material presentaba una mayor variabilidad inherente al suelo natural, la Muestra 3 exhibe un difractograma más compacto, con menor dispersión de reflexiones, señal de un material más homogéneo y con menos fluctuaciones en su composición mineral. Este tipo de patrón generalmente está vinculado a materiales que han mantenido su estabilidad en un ambiente de construcción, sin sufrir procesos significativos de alteración o meteorización. En general, la Muestra 3 conserva la coherencia mineralógica que se observó en el estudio y muestra una condición estructural interna que indica una preservación apropiada del material.

Conclusiones y/o recomendaciones (discusión)

Se demostró que las tierras recogidas en Liberia tienen un predominio de SiO_2, con cantidades intermedias de Fe_2O_3 y Al_2O_3, así como fases feldespáticas muy cristalinas, a través de una caracterización integral que se realizó usando XRD, DSC y XRF. Esta composición es típica de los materiales en tierra que se emplean como cerramientos no portantes y presenta buena estabilidad química, escasa expansión y resistencia a la intemperización. El análisis térmico realizado por DSC reveló transiciones endotérmicas relacionadas con la descomposición orgánica y la pérdida de humedad, lo que confirma el material como térmicamente estable.

Adicionalmente, esta caracterización permitió determinar el calor específico de las muestras, información que junto con los valores de conductividad térmica constituye un requisito indispensable para alimentar el software de simulación higrotérmica del proyecto. Dichas simulaciones permitían demostrar que los muros poseen una alta inercia térmica, capacidad que contribuye a la estabilización de la temperatura interna a lo largo del año en climas cálidos como el de Liberia. Adicionalmente, los resultados obtenidos no solo confirman el potencial técnico de la tierra local como material de cerramiento, sino que también ponen en valor esta técnica constructiva desde una perspectiva cultural, científica y bioclimática.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al apoyo de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Los autores expresan también su agradecimiento al Centro de Investigación y Extensión en Ciencias e Ingeniería de los Materiales (CIEMTEC) por el acceso a los equipos analíticos y por la asistencia técnica brindada durante el proceso de caracterización.

Referencias

[1] Á. J. Hernández Carazo, "¿Por qué Costa Rica desconfía de la arquitectura de tierra?," *XVII Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (SIACOT)*, La Paz, Bolivia, Oct. 9–12, 2017. [En línea]. Disponible en: https://share.google/sJXzdyiPcDIVDgCue

[2] R. J. Ansaa-Asare, A. Razakamanantsoa, E. Hamard, M. Duc, B. Cazacliu, and L. Verron, "Impact of earth variability and implementation processes on hydromechanical and microstructure properties of sustainable construction materials," *Construction and Building Materials*, vol. 417, p. 135303, Feb. 2024. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135303

[3] M. Carcedo Fernández, *Resistencia a compresión de bloques de tierra comprimida estabilizada con materiales de sílice de diferente tamaño de partícula*, Trabajo Fin de Máster, Univ. Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, Madrid, España, 2012. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/10672/3/TESIS_MASTER_MIGUEL_CARCEDO_FERNANDEZ.pdf

[4] ThermoFisher Scientific, "What is XRF (X-ray fluorescence) and How Does it Work?," *Ask a Scientist*, Jan. 28, 2020. https://www.thermofisher.com/blog/ask-a-scientist/what-is-xrf-x-ray-fluorescence-and-how-does-it-work/

[5] K. Wirth and A. Barth, "X-Ray Fluorescence (XRF)," *Techniques*, Oct. 2019. https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRF.html

[6] J. Xiao, Y. Song, and Y. Li, "Comparison of Quantitative X-ray Diffraction Mineral Analysis Methods," *Minerals*, vol. 13, no. 4, p. 566, 2023. https://doi.org/10.3390/min13040566

[7] D. F. Venegas Vasconez, *Calorimetría diferencial de barrido*, 2017. [En línea]. Disponible: ResearchGate, public. n.º 316860989. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Diego-VenegasVasconez/publication/316860989_CALORIMETRIA_DIFERENCIAL_DE_BARRIDO/links/5914a4aeaca27200fe4e8a07/CALORIMETRIA-DIFERENCIAL-DE-BARRIDO.pdf

[8] M. Barreto Gutiérrez, *Aplicación de la calorimetría diferencial de barrido (DSC) en el análisis de materiales poliméricos de piezas automotrices*, Memoria de experiencia profesional, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/8256/1/FIQ-L-2021-0811.pdf

[9] S. Ibenyahia, *Optimization Analysis of Clay and Earth-Based Construction Materials' Formulation*, Bachelor Thesis, School of Science and Engineering, Al Akhawayn University, Ifrane, Morocco, Apr. 25, 2023. [En línea]. Disponible en: https://cdn.aui.ma/sse-capstone-repository/pdf/spring-2023/OPTIMIZATION%20ANALYSIS%20OF%20CLAY%20AND%20EARTH-BASED%20CONSTRUCTION%20MATERIALS'%20FORMULATION.pdf

[10] X. Gu and Y. Ling, "Characterization and properties of Chinese red clay for use as ceramic and construction materials," *Science Progress*, vol. 107, no. 1, pp. 1–17, 2024, doi: 10.1177/00368504241232534

[11] M. Serpilli, F. Stazi, G. Chiappini, and S. Lenci, "Earthen claddings in lightweight timber framed buildings: An experimental study on the influence of fir boards sheathing and GFRP jacketing," *Construction and Building Materials*, vol. 285, p. 122896, May 2021, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122896

[12] T. V. Tagle, «¿Como se forma el aluminio en el suelo y cuáles son sus consecuencias?», *Nova Agro*, 30 de junio de 2024. https://novaagro.cl/como-se-forma-el-aluminio-en-el-suelo-y-cuales-son-sus-consecuencias/

[13] O. Acevedo-Sandoval, E. Ortiz-Hernández, M. Cruz-Sánchez, y E. Cruz-Chávez, «El papel de óxidos de hierro en suelos», *Terra Latinoamericana*, vol. 22, n.o 4, pp. 485-497, ene. 2004, [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/573/57311096013.pdf

[14] Conti, M. E. 2004. Dinámica de la Liberación y Fijación de Potasio en el Suelo. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. Disponible en : https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-ymca/anatomia-y-fisiologia/dinamica-de-la-liberacion-y-fijacion-de-potasio-en-el-suelo/21191864

[15] A. Alvarado-Hernández, J. C. Mora-Baeza, M. Vázquez-Cruz y A. L. Gómez-Merino, "Contenido de carbonatos de calcio y su relación con óxidos metálicos en un Andisol", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 8, núm. 1, pp. 11, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222017000100261

[16] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), *Toxicological Profile for Manganese*, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta, GA, 2012. [En línea]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp151.pdf

[17] A. A. Rodríguez-Pinos, K. G. Salazar-Llangarí, M. A. Guadalupe-Alcoser, y D. F. Guerrero-Bonilla, «Obtención de dióxido de titanio a partir de arenas ferrotitaníferas ecuatorianas mediante el método del cloro», *Polo del Conocimiento: Revista Científico - Profesional*, vol. 6, n.o 5, pp. 302-316, may 2021, doi: 10.23857/pc.v6i5.2660.

[18] G. Giuffrida, R. Caponetto, and F. Nocera, "Hygrothermal properties of raw earth materials: A literature review," *Sustainability*, vol. 11, no. 19, p. 5342, 2019. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/su11195342

[19] E. Gazel, G. E. Alvarado, J. Obando, y A. Alfaro, «Geología y evolución magmática del Arco de Sarapiquí, Costa Rica», *Revista Geológica de América Central*, n.o 32, feb. 2006, doi: 10.15517/rgac.v0i32.4242.

[20] G. H. Floor, *Selenium Cycling in Volcanic Environments: The Role of Soils as Reactive Interfaces*, Universitat de Girona, 2011. [En línea]. Disponible en: https://tesisenred.net/handle/10803/31831#page=1 . [Accedido: 8-may-2025].

[21] J. Widmann, "Interpretación de curvas; Parte 2: Mediciones isotérmicas," *UserCom*, no. 2, METTLER TOLEDO, 2000. [En línea]. Disponible en: https://www.mt.com/mt_ext_files/Editorial/Generic/3/TA_UserCom12_0160929710242401_files/tausc12s.pdf

[22]. L. A. Solís Sánchez, *Propiedades físicas y caracterización de materiales compósitos usados en la arquitectura de tierra*, Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias (Física Aplicada), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, jul. 2024. . [En línea]. Disponible en: https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/49b9a7b8-d608-4988-baf6-4bb7804d4ba4/content

[23] D. B. Tagua, B. P. Barbero y J. A. González, "Efecto de la temperatura de calcinación sobre la estructura y estabilidad de arcillas naturales de la provincia de San Luis," en *8vo. Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales – JIM 2023*, Córdoba, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, AJEA, 7–8 sep. 2023. [En línea]. Disponible en: https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/1523/1399

[24] L. Sánchez Muñoz, J. García Guinea, and S. López Andrés, "Caracterización estructural simple de feldespatos alcalinos: metodología de trabajo," *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, vol. 30, no. 2, pp. 69–79, 1991. https://hdl.handle.net/20.500.14352/57165

[25] F. Deon, F. van Ruitenbeek, H. van der Werff, M. van der Meijde, and C. Marcatelli, "Detección de minerales arcillosos de ilita/esmectita intercalados mediante análisis de difracción de rayos X (DRX), microscopio electrónico de barrido (SEM) y espectroscopia de reflectancia," *Sensores*, vol. 22, no. 9, p. 3602, May 2022, https://doi.org/10.3390/s22093602

[26] B. Hejazi, C. Luz, F. Grüner, J. Frick, and H. Garrecht, "Characterisation of Adobe and Mud–Straw for the Restoration and Rehabilitation of Persian Historical Adobe Buildings," *Materials*, vol. 17, no. 8, p. 1764, 2024. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/ma17081764

[27] J. Youssef, K. Bouchra, B. Larbi, B. Bouamar, F. Azzeddine, and J. Zakariae, "Characterization of Earthen Bricks Used in Ancient Constructions in the Marrakech Region, Morocco," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 14, no. 1, pp. 613–629, 2026. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.13189/cea.2026.140141

[28] A. Mellaikhafi, A. Tilioua, H. Souli, M. Garoum, and M. A. Alaoui Hamdi, "Characterization of different earthen construction materials in oasis of south-eastern Morocco (Errachidia Province)," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, p. e00496, 2021. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00496

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.