

## Colorimetría de arcillas modificadas con adiciones minerales y orgánicas

W. Martínez<sup>1,2,\*</sup> , A. A. Torres-Acosta<sup>3,4</sup> , E. M. Alonso-Guzmán<sup>1,2,5</sup> , H. L. Chávez<sup>1,6</sup> ,  
C. Lara<sup>1</sup> , A. Bedolla<sup>5</sup> , H. Z. López<sup>7</sup> , J. L. Ruvalcaba<sup>8</sup> 

\*Autor de Contacto: [wilfridomartinezmolina@gmail.com](mailto:wilfridomartinezmolina@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.277>

Recepción: 24/10/2017 | Aceptación: 21/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

### RESUMEN

El objetivo es cuantificar los valores de los diferentes colores obtenidos en arcillas con adiciones, comparados contra una arcilla base. Se explora la apreciación estética, en base al color de las arcillas con diferentes adiciones usando arcilla del Banco Santiago Undameo, México. Las adiciones son yeso, cal, mucílago de cactus opuntia, cemento portland e hidróxido de sodio. Los porcentajes en peso fueron 2, 4, 6, 8 y 10%. Los mejores comportamientos colorimétricos fueron los resultados obtenidos del cemento portland al 6%, hidróxido de sodio al 4%, cal y yeso al 8% y mucílago de cactus opuntia blanco con porcentajes al 4 y 8%. Algunas construcciones donde se emplearon estos materiales arcillosos son: Casas Grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco; Yácatas en Tzintzuntzán, entre otros.

**Palabras clave:** arcilla; colorimetría; adiciones; restauración.

**Citar como:** W. Martínez, A. A. Torres-Acosta, E. M. Alonso-Guzmán, H. L. Chávez, C. Lara, A. Bedolla, H. Z. López, J. L. Ruvalcaba (2018), “Colorimetría de arcillas modificadas con adiciones minerales y orgánicas”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 163 - 177, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.277>

<sup>1</sup>Departamento de Materiales, FIC-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

<sup>2</sup>Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, FIC-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

<sup>3</sup>UMQ, Santiago de Querétaro, Querétaro, México, 76000

<sup>4</sup>IMT-SCT, Sanfadila, Querétaro, México, 76000

<sup>5</sup>FArq-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

<sup>6</sup>Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, FIC-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

<sup>7</sup>FArq-UABJO, Oaxaca, Oaxaca, México, 68000

<sup>8</sup>Laboratorio LANCIC, IF-UNAM, Ciudad de México, México 04510

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo, No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

## Colorimetry of modified clays with mineral and organic additions

### ABSTRACT

The objective of this investigation was to quantify the colorimetric values of different clays with some additions. Exploring the aesthetic appreciation, based on the clay color, of different additions percentages (by clay mass) with Santiago Undameo Bank, Mexico, clays as main matrix. Clay was kaolinite and the additions were gypsum, lime, opuntia cactus mucilage, portland cement, and sodium hydroxide. The addition percentages were 2%, 4%, 6%, 8% and 10%. The best colorimetric performances were obtained from Portland cement at 6%, sodium hydroxide at 4%, lime and gypsum at 8% and opuntia cactus mucilage at 4% and 8%. Some buildings where these clay materials were used are: Casas grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco, Yácatas en Tzintzuntzan, among others.

**Keywords:** clay; colorimetry; additions; restoration.

## Colorimetria de argilas modificadas com adições minerais e orgânicas

### RESUMO

O objetivo é quantificar os valores das diferentes cores obtidas em argilas com adições. Exploramos a apreciação estética de diferentes adições e porcentagens de argilas do Banco Santiago Undameo, no México. As adições são gesso, lima, mucilagem de cítrica de opuntia, cimento portland e hidróxido de sódio; os percentuais em peso da argila são 2, 4, 6, 8 e 10%; os melhores comportamentos colorimétricos foram obtidos a partir de cimento portland a 6%, hidróxido de sódio a 4%, lima e gesso a 8% e mucilagem de branco opuntia cactus com porcentagem de 4% e 8%. Alguns edifícios onde esses materiais de argila foram utilizados são: Casas grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco, Yácatas en Tzintzuntzan, entre outros.

**Palavras chave:** argila; colorimetria; adições; restauração.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de la restauración, es muy importante determinar la pérdida de la intensidad del color de los materiales utilizados para restaurar o conservar, ya que la observación subjetiva puede conducir a errores en la apreciación de las tonalidades.

Debido a su disponibilidad y facilidad para modificar sus propiedades adecuándolas a las necesidades de aplicación, las arcillas son ampliamente utilizadas en la construcción y la alfarería. Debe tenerse presente que la restauración de los edificios históricos es una intervención que busca ante todo la recuperación respetuosa de dicho patrimonio cultural, por lo que requiere de especialistas en la materia para la elaboración de los proyectos, la realización de las investigaciones pertinentes y de los análisis necesarios, la dirección y supervisión de la obra, con el fin de que las intervenciones propuestas en el proyecto se apliquen en la obra de manera correcta, respetuosa, socialmente responsable.

### 1.1 Antecedentes

La presente investigación se realizó para complementar los estudios de construcciones elaboradas a base de tierra cruda, adobes, lo que tiene relevancia en cuanto a su conservación y restauración en México, Latinoamérica y el mundo entero, ya que existe una cantidad considerable de artefactos e inmuebles con gran valor cultural elaborados a base de este material, especialmente del preclásico y el epiclásico (Cuéllar López, 2014).

El banco de arcilla para extraer el material de estudio se eligió en virtud de que en la ribera del lago de Pátzcuaro (Pueblo Mágico), México, existen importantes templos católicos patrimoniales de la colonia, construidos con mamposterías mixtas de arcilla, ignimbritas y tobas, con proporciones concebidas según los tratadistas europeos Vitrubio, Palladio y Alberti, pero con tecnología histórica modificada por el grupo étnico Purhépecha. Ejemplos de este tipo de construcciones son la Basílica de Nuestra Señora de la Salud, los templos de Janitzio, Jeráhuaro, Tzintzuntzán, Quiroga, Santa Fe, Ihuatzio, Cucuchucho, Napízaro, Erongarícuaro, Ichupio, San Andrés, San Jerónimo y otros.

Las arcillas no son materiales translúcidos ni incoloros, suelen presentar colores que van desde el blancuzco hasta el negro (Eleoterio et.al., 2016), pasando por ocres, cafés, rojizos, grises; menos común, pero verdes también. Las arcillas se usaban también en pinturas de decoración para colorear (Rathossi et.al., 2010; Lin et.al., 2014; Viscarra et.al., 2009; Hu et.al., 2007). Los colores rojizos y ocres son debidos a los óxidos de hierro presentes en las diferentes arcillas (Mahmoudi et.al., 2016; Hradil et.al., 2016; Valanciene et.al., 2010; Li et.al., 2015).

Las arcillas pueden ser minerales cristalinos como el Cuarzo, pero con magnitudes  $\leq 2 \mu\text{m}$  y entonces se consideran como minerales arcillosos por encontrarse en sedimentos arcillosos (Özkan y Zeliha, 2016). Su estructura cristalina laminar les permite presentar cambios volumétricos higroscópicos y gran área superficial. Las arcillas son materiales plásticos, expansivos y contráctiles en función de su humedad, por lo cual se busca modificar este comportamiento con diferentes materiales adicionados para evitar los cambios volumétricos, y se les conoce como estabilizantes volumétricos o sólo se les llama estabilizantes. La literatura habla de algunos estabilizantes como por ejemplo, la cal, que reduce la expansión-contracción del material, sugiriendo valores máximos de los mismos en porcentaje del 15 % del peso de la arcilla. Los estabilizantes se emplean también dado que las arcillas son solubles en agua y tienen poca durabilidad frente al ataque del medio ambiente (lluvia, sol, radiación solar, humedad capilar, precipitación pluvial, vientos dominantes, etc.), a menos que se sometan a temperaturas que las conviertan en cerámicos, que son materiales más estables física y mecánicamente hablando (Özkan y Zeliha, 2016). Se han utilizados materiales estabilizantes como: cemento hidráulico, fosfatos, sales de aluminio y recientemente, los polímeros, estos materiales modifican las propiedades físico-químicas de las arcillas reduciendo su expansión ante la presencia de agua (López et.al, 1999).

Se tienen otros materiales estabilizantes como: cal (Anikwe et.al., 2016; Zhang et.al., 2015; Hotineanu et.al., 2015; Khemissa y Mahamedi, 2014; Modarres y Nosoudy, 2015; Sangiorgi et.al., 2016), cemento (Vali Vakili et.al., 2016; Wu et.al., 2016; Mardani-Aghabaglou et.al., 2015; Zak et.al., 2016; Gupta et.al., 2017), hidróxido de sodio (sosa cáustica) (Yaowu et.al., 2017; Cong et.al., 2015;; Carrol et.al., 1971), mucílago de cactus opuntia blanco y yeso (Flores Rentería, 2010; Olguín Domínguez, 2008; Velázquez Pérez, 2015; Ahmed et.al., 2014; Kuttah y Sato, 2015; Ahmed y Ugai, 2011). Estos investigadores encontraron como resultado de sus estudios materiales con menores cambios volumétricos y colores similares para la elaboración de adobes y morteros para la reconstrucción del patrimonio cultural, sustentables y más afines con el medio ambiente. La adición de macrofibras orgánicas a las arcillas no modifica sustancialmente el color, su principal beneficio estriba en soportar solicitaciones dinámicas y meteóricas (Mattone, 2005), que no es el objetivo del presente trabajo.

De igual forma, en un estudio previo se utilizaron varias adiciones con contenidos de 1% a 10% en peso de la arcilla. Valores superiores al 10% resultaron en cambios de color a simple vista. Los menores cambios se observaron con porcentajes de hasta el 10% en peso de la arcilla (Flores Rentería, 2010; de León Ambrosio, 2017; Flores Ponce 2018). Se observó que no hubo mayores cambios estéticos y mecánicos significativos entre las parejas: 1% y 2%, 3% y 4%, 5% y 6%, 7% y 8%, 9% y 10%.

El objetivo es dotar de estabilidad volumétrica a las arcillas estudiadas para que puedan ser utilizadas con fines de restauración, principalmente, pero teniendo una alteración mínima en las propiedades colorimétricas con respecto a la arcilla original.

## 1.2 Análisis Colorimétrico

La cuantificación de la colorimetría es una prueba no destructiva (Gómez 2008; Johnston, 2001; Lamb and Bourriau, 1995), que afortunadamente puede realizarse también in situ, para los casos de inmuebles patrimoniales.

Existen múltiples sistemas para medición del color como son: Münsell (Albert Henry Münsell, 1915), Ostwald (Friedrich Wilhelm Ostwald, Ciencia del Color 1923, Nobel 1909), DIN (Deutsche Institut für Normung o German Standards Institute), Natural Sueco (Skandinaviska Färginstitutet AB, el Instituto Escandinavo del Color en 1960, que posteriormente cambió a NCS), NCS (Natural Color System, EEUU, 1985), OSA (OSA-UCS, Optical Society of America Uniform Color Space, 1947), Küppers (Harald Küppers, Alemania, Teoría del Color, 1992), etc.

La Comisión Internacional de la Iluminación en 1924, CIE por sus siglas en francés (Commission Internationale de l'Éclairage), desarrolló dos de los más utilizados sistemas para la evaluación y medición del color en términos de la reflectancia; capacidad de las superficies de reflejar la luz espectral de la muestra; el primero de ellos fue creado en 1931 con base en los valores triestímulo (X, Y, Z) y el segundo fue creado en 1976 referido a los espacios de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ).

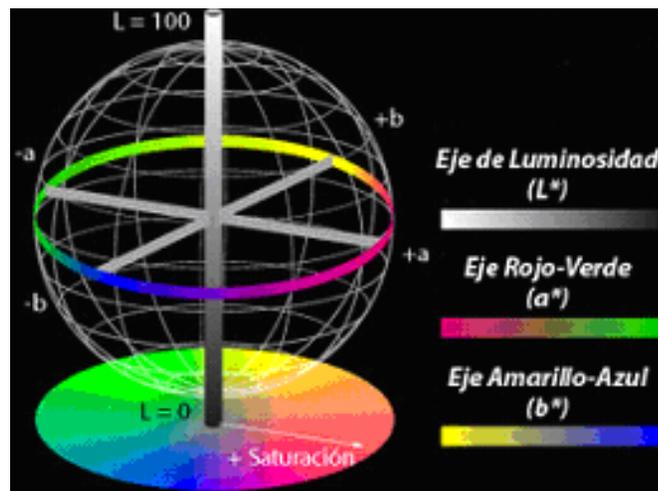


Figura 1. Diagrama de espacios de color  $L^*a^*b^*$ . El eje  $L^*$  o de luminosidad va de 0 (negro) a 100 (blanco), mientras que el eje  $a^*$  y  $b^*$  va de  $-128$  a  $127$ . Aquellos casos en los que  $a^* = b^* = 0$  son acromáticos, por ello el eje  $L^*$  representa la escala acromática de grises que va del blanco al negro, Stephen Westland ©.

El sistema CIE XYZ especifica los estímulos cromáticos basándose en valores triestímulo de tres primarios y la base de este sistema fue el observador estándar  $2^\circ$ . Este observador estándar de  $2^\circ$  es el resultado de establecer experimentalmente una igualdad entre longitudes de onda monocromáticas con mezclas de los tres primarios aditivos (rojo, verde y azul). Por otra parte, los valores triestímulo son cantidades de estos primarios que especifican un estímulo de color, se conocen como X (rojo), Y (verde) y Z (azul) y para el observador de  $2^\circ$  tienen un valor de  $X = 55.55$ ,  $Y = 57.33$  y  $Z = 90.25$ .

Por ello, ante la necesidad de un espacio de color uniforme se creó el sistema CIE  $L^*a^*b^*$ , también conocido como CIELAB, que es un sistema basado en la luminosidad  $L^*$  (claro u oscuro) y en los colores opuestos  $a^*$  ( $a^*$  positivo rojo, y  $-a^*$  negativo verde) y  $b^*$  ( $b^*$  positivo amarillo, y  $-b^*$  negativo azul), que indican la orientación del color (Figura 1).

Después de haber cuantificado el color, fue necesario cuantificar la diferencia entre una referencia y una muestra. El cálculo de estas diferencias del color es una de las aplicaciones más importantes de la colorimetría.

Bajo estos términos, la colorimetría resulta una herramienta muy útil en los tratamientos conservativos de distintas obras de arte y del patrimonio cultural y artístico, pues durante estos trabajos, no deben alterarse las características estéticas ni cromáticas del objeto, respetando el trabajo original de los autores. Para lograrlo, se debe llevar a cabo una selección correcta de los materiales a utilizar durante las distintas intervenciones, tomando en cuenta la efectividad de los tratamientos utilizados y las modificaciones cromáticas que la obra puede sufrir. Es así que, con el propósito de minimizar los cambios cromáticos en los bienes restaurados, es necesario realizar un estudio colorimétrico antes, durante y después de cada restauración, para lograr una aplicación de materiales en la restauración de una manera lo menos perceptible posible.

## 2. PROCEDIMIENTO

En primer lugar, se llevó a cabo una caracterización de la arcilla por difracción de rayos X que permitió determinar la composición de la arcilla base y posteriormente se realizó un análisis colorimétrico a ésta y a las distintas adiciones con la finalidad de observar los efectos en sus propiedades colorimétricas, limitándonos a pruebas enfocadas para este fin, dejando de lado las propiedades mecánicas ya que no es el objetivo del presente trabajo.

### 2.1 Materiales empleados

Las arcillas provinieron del Banco de Arcilla de Santiago Undameo, Michoacán, México, cercano a la capital, ubicada en las coordenadas 19°42' de latitud norte y 101°11.4' de longitud oeste. Además de esta arcilla, se usaron adiciones con diferentes materiales de origen mineral y orgánico como se indicó.

Con estos resultados para el diseño del experimento, se eligieron los porcentajes de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, de acuerdo con estudios realizados por (Flores Rentería, 2010; de León Ambrosio, 2017; Flores Ponce, 2018), comparándose contra un testigo con cero adiciones.

### 2.2 Preparación de especímenes

La arcilla seleccionada se adicionó con los estabilizantes, según lo indicado en la norma ASTM D 6276, los materiales de adiciones se incorporaban a la mezcla en el momento de combinar los materiales (arcilla-adición) y agua para el amasado en los porcentajes indicados. Las adiciones se incorporaron en seco, manteniendo constante la temperatura ambiente entre 23-25°C, y verificando el pH de la mezcla, de alrededor de 12.4 (Flores Rentería, 2010). Los especímenes empleados en la cuantificación del color fueron pastillas estabilizadas de arcilla de 1.5 pulgadas de diámetro con ¼ pulgada espesor, como se observa en la Figura 3.

### 2.3 Análisis por Difracción de Rayos X

En el análisis por Difracción de rayos X, para asegurar la orientación al azar de estas partículas con respecto al haz incidente monocromático, se colocó la muestra sin compactación (Dyson, 2004; Benjamin, 1969; Kittel 2005).

En este caso se empleó un difractómetro Bruker AXS modelo D8 Advance con un detector Linx, y un tubo de rayos X de Cu con un monocromador. La figura 2 indica el difractograma de rayos X correspondiente a la arcilla estudiada. Los picos obtenidos se compararon con los patrones de reflexión de la base de datos de la JCPDF, esta comparación permitió establecer que la arcilla estudiada está compuesta mayormente por cuarzo (Q) y caolinita (K). En zonas donde las rocas graníticas y pórfidos se descomponen a gran escala, las arcillas suelen encontrarse en grandes capas de caolín, mezclado con cuarzo libre y óxidos de hierro de algunos otros minerales presentes (Dana, 1986). La DRX se realizó en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM). Las caolinitas presentan áreas superficiales de 15 a 50 m<sup>2</sup>/gr.

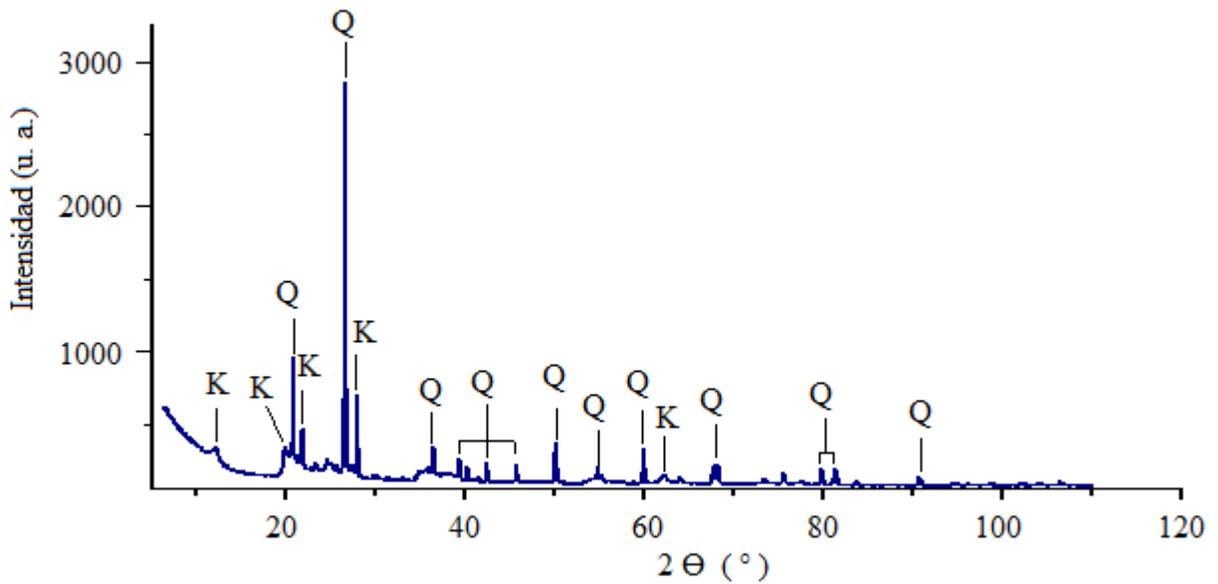


Figura 2. DRX de la arcilla, tipo de cristal identificado; Q se refiere a cuarzo y K a caolinita.

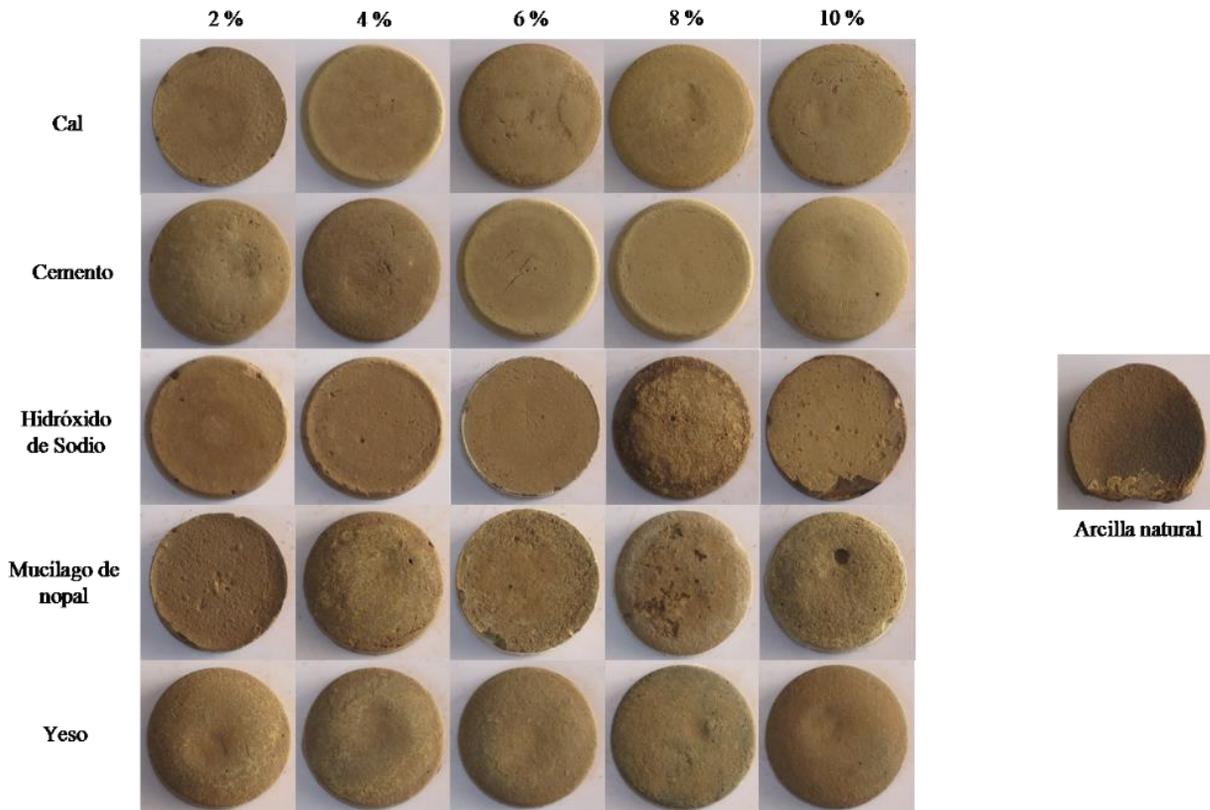


Figura 3. Pastillas o Comprimidos de arcilla adicionados con cal, cemento portland, hidróxido de sodio, mucílago de cactus opuntia blanco, y yeso, en porcentajes de 2, 4, 6, 8 y 10 %.

#### 2.4 Análisis colorimétrico

Para estabilizar la arcilla base, se adicionaron 5 distintos materiales o productos: cal, cemento portland, yeso, mucílago de nopal e hidróxido de sodio (sosa cáustica). El objetivo de estas mediciones colorimétricas es establecer los cambios cromáticos que los distintos estabilizantes y concentraciones producen, en comparación con la arcilla natural.

Los análisis colorimétricos de la arcilla natural y de las arcillas con adiciones con concentraciones antes mencionadas, se realizaron directamente sobre los especímenes con un espectrofotómetro Ocean Optics USB2000 con fibra óptica para luz visible e infrarrojo, detector lineal CCD de silicio y sonda doble de fibras de 400 micrómetros de diámetro.

La sonda consta de seis fibras que iluminan la superficie y una sonda central efectúa la lectura de la luz dispersada. El equipo se calibró con una referencia de blanco y se restó el ruido correspondiente a la medición captada de negro con la rejilla del detector cerrada. El tiempo de integración para cada medición fue de 50 ms y se realizaron 10 integraciones para disminuir el ruido de los espectros de luz dispersada.

Los especímenes se analizaron por el anverso y el reverso, se realizaron tres medidas en cada uno de los lados en zonas claras, oscuras y medias con la finalidad de promediar las medidas del color obtenidas. Los datos referentes a la luminancia, coordenadas  $a^*$  y  $b^*$ , croma (C) y matiz (h), se analizaron con el software del equipo Ocean Optics SpectralSuite®.

### 3. RESULTADOS

Utilizando este arreglo, se establecieron las medidas colorimétricas de la arcilla natural de acuerdo a la Tabla 1. Graficando estos datos en el espacio CIE  $L^*a^*b^*$  figura 4, y realizando una yuxtaposición con la región del círculo cromático correspondiente a estas coordenadas, fue posible establecer que la arcilla presenta tonalidades rojas y amarillas – como era de esperarse pues este compuesto adquiere dicho color al ser horneado.

La luminosidad de la arcilla se encuentra casi en el centro del sistema CIE  $L^*a^*b^*$ , por lo que puede considerarse que es un material ligeramente opaco. Esta característica puede deberse a que la superficie de dicho compuesto es rugosa, lo que evita una reflexión especular de luz que recibe. Debido a ello, si se desea igualar colorimétricamente este compuesto, no sólo es necesario buscar unas medidas colorimétricas similares, sino también una textura similar. Además, para fines de experimentación y normativa, las arcillas pasaron malla 200 ASTM y se retuvieron en malla 400 ASTM, implica un diámetro de 63.5 a 127micras

Tabla 1. Coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$  de la arcilla natural utilizada, en dicha tabla se muestra el promedio de luminosidad ( $L^*$ ), cantidad de rojo – verde ( $a^*$ ) y azul – amarillo ( $b^*$ ) que tiene la muestra, así como también el matiz (h) y la croma (C) de ésta.

ARCILLA NATURAL (TESTIGO SIN ADICIONES)				
$L^*$	$a^*$	$b^*$	H	C
43.2± 6.2	11.1± 2.8	11.8± 4.0	46.0± 2.4	16.2± 4.8
37.00 a 49.40	8.30 a 13.90	7.80 a 15.80	43.60 a 48.40	11.40 a 21.00

Los datos anteriores de tabla 1 y figura 4 sirven como comparativo para las medidas colorimétricas de las distintas adiciones. En el caso de las adiciones de cal a la arcilla, figura 5, se encontró que, si bien las concentraciones de 2, 4 y 8 % son colorimétricamente comparables con la arcilla natural, las concentraciones del 6 y 10 % no lo fueron, pues sus distancias a las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  de la arcilla tienen valores mayores a los de la desviación estándar reportada para dichos datos.

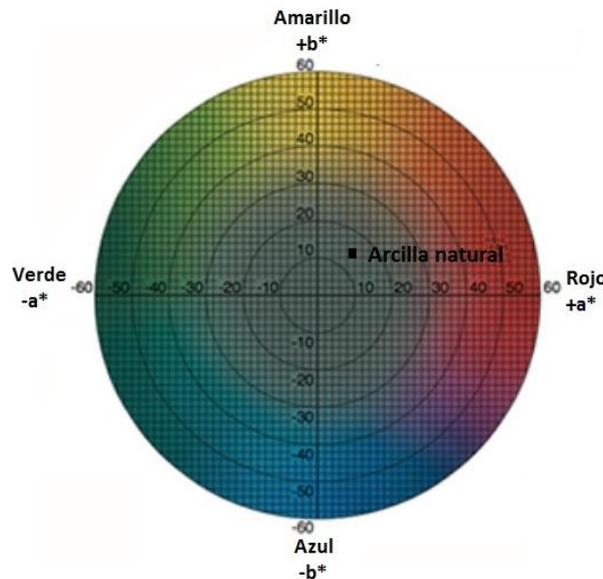


Figura 4. Se muestran, en promedio, las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  de la muestra de arcilla natural, así mismo se indica el tono de esta con el círculo cromático.

Esto es posible analizarlo también con la figura 5, que indica la posición de las adiciones en comparación con la arcilla. En dicha figura 5, es visible que los puntos correspondientes a las adiciones de 6 y 10 %, son los más alejados de la posición colorimétrica de la arcilla. Se considera que se requiere una diferencia de dos unidades en este sistema de coordenadas colorimétricas para que una diferencia en color sea visible con el ojo humano.

La cantidad de luminosidad de la arcilla con adición de cal es comparable con la cantidad lumínica de la arcilla natural pues los valores medidos, con su respectiva desviación estándar, se encuentran dentro de la incertidumbre en comparación del valor de la arcilla.

Las medidas colorimétricas de las arcillas con diferentes concentraciones de cemento están indicadas en la Figura 6. Análogamente al razonamiento para la cal, se compararon las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  de dicha adición con la arcilla natural; con base en ello se encontró que, a excepción de la coordenada  $b^*$  de la adición de 8 %, todas las distancias colorimétricas son menores a las desviaciones de las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  correspondientes a cada adición. Esto permite afirmar que las medidas colorimétricas de la arcilla natural y las adiciones de cemento en cualquier porcentaje son muy similares.

Esto se hace patente en la figura 6 donde es evidente que, si bien hay puntos muy alejados de la arcilla, como es el caso de la adición del 2 %, este valor se encuentra dentro de la incertidumbre. El cemento también presenta valores lumínicos comparables con los de la arcilla natural, en general, es más luminoso; sin embargo, las desviaciones de estos valores incluyen el valor de la arcilla natural.

En las arcillas con las adiciones de hidróxido de sodio (sosa cáustica) ocurre una situación similar a la del cemento: todas las distancias colorimétricas se encuentran dentro del intervalo de la desviación estándar, a excepción de la coordenada  $b^*$  de la adición de 8 %. Esto puede verificarse en la figura 7, donde el punto correspondiente a la arcilla sólo queda fuera de la incertidumbre marcada para la coordenada  $b^*$  de la adición de 8 %.

A excepción de la adición del 8 %, el hidróxido de sodio es más luminoso que la arcilla natural, pero la desviación estándar de todas las concentraciones indica que dichos valores son comparables con la luminosidad de la arcilla natural.

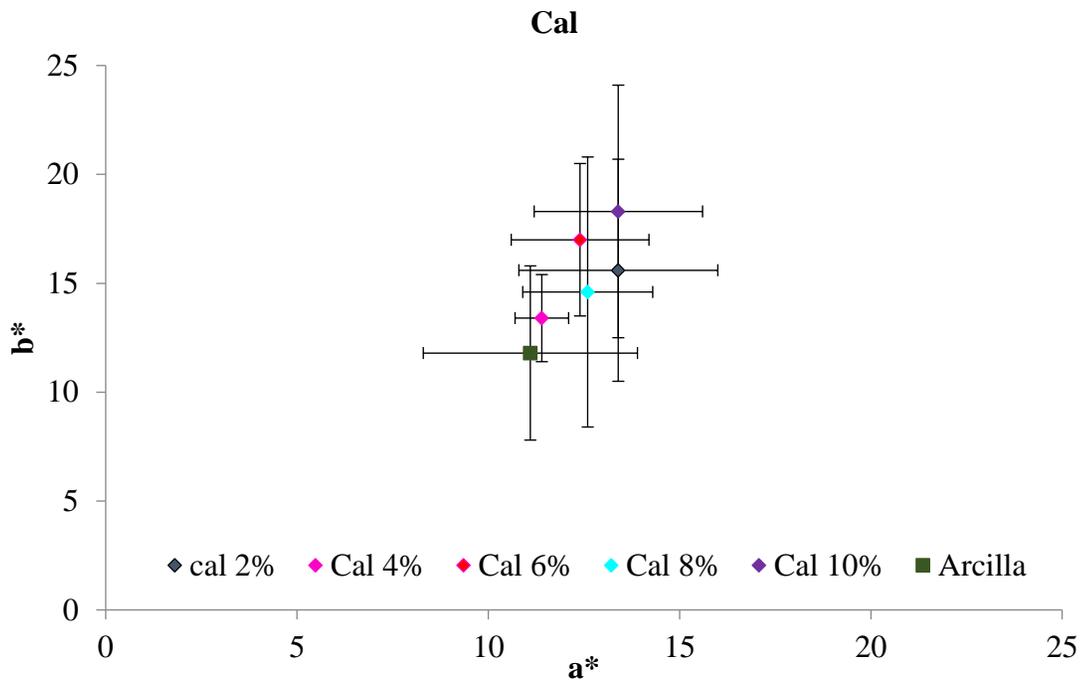


Figura 5. En esta figura se muestran, en promedio, las coordenadas a\* y b\* de las distintas adiciones en porcentajes, de la cal, así como también se muestra la posición colorimétrica de la arcilla natural y se esquematiza el tono de estos puntos con el círculo cromático.

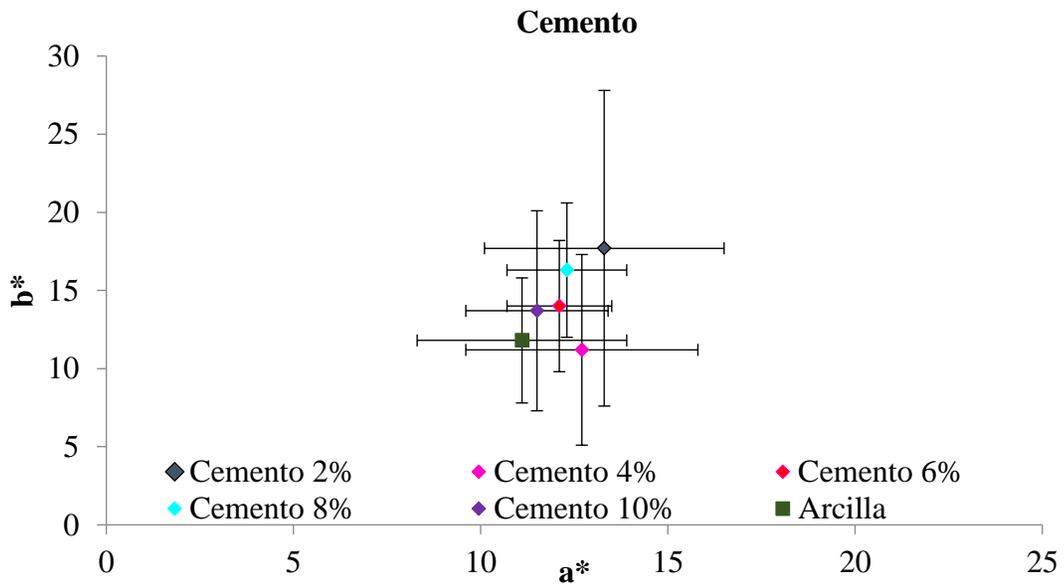


Figura 6. En esta figura se muestran, en promedio, las coordenadas a\* y b\* de las distintas adiciones del cemento portland, así como también se muestra la posición colorimétrica de la arcilla natural y se esquematiza el tono de estos puntos con el círculo cromático.

**Hidróxido de Sodio (Sosa Cáustica)**

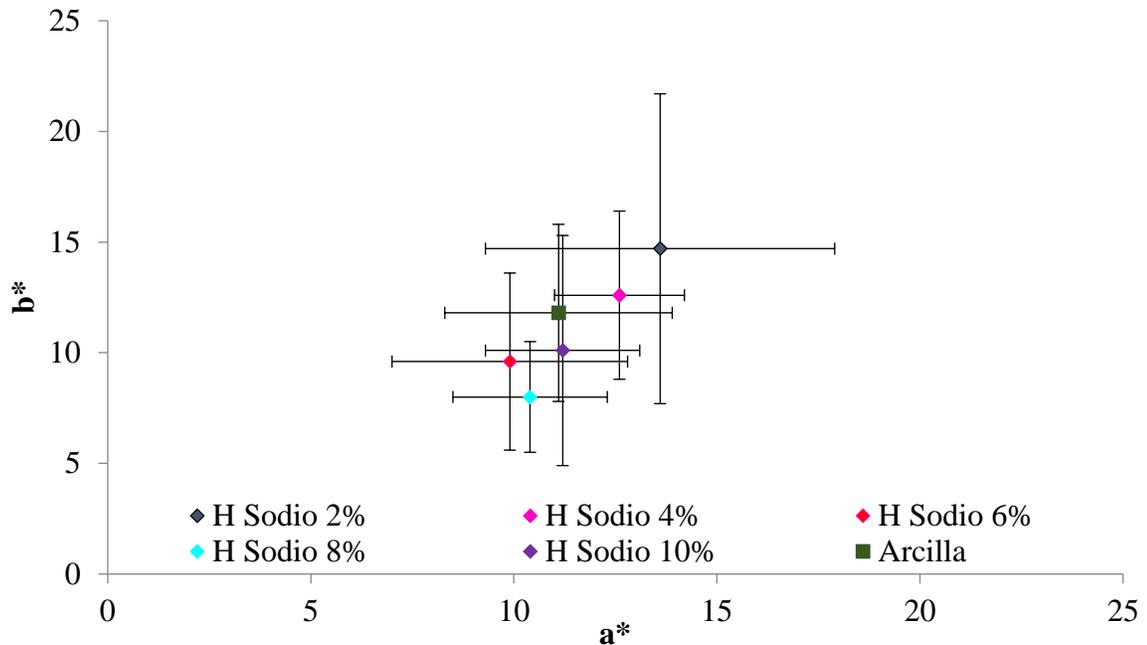


Figura 7. En esta figura se muestran, en promedio, las coordenadas a\* y b\* de las distintas adiciones del hidróxido de sodio, así como también se muestra la posición colorimétrica de la arcilla natural y se esquematiza el tono de estos puntos con el círculo cromático.

En lo que se refiere a las arcillas con adición de mucílago de nopal, la distancia colorimétrica entre la arcilla y la adición de 6 % se encuentra fuera de la desviación estándar, esto se verifica con la figura 8, por lo que también en este caso se puede decir que existe una similitud satisfactoria entre los tonos de las distintas adiciones de mucílago de nopal y la arcilla.

**Mucílago de Nopal**

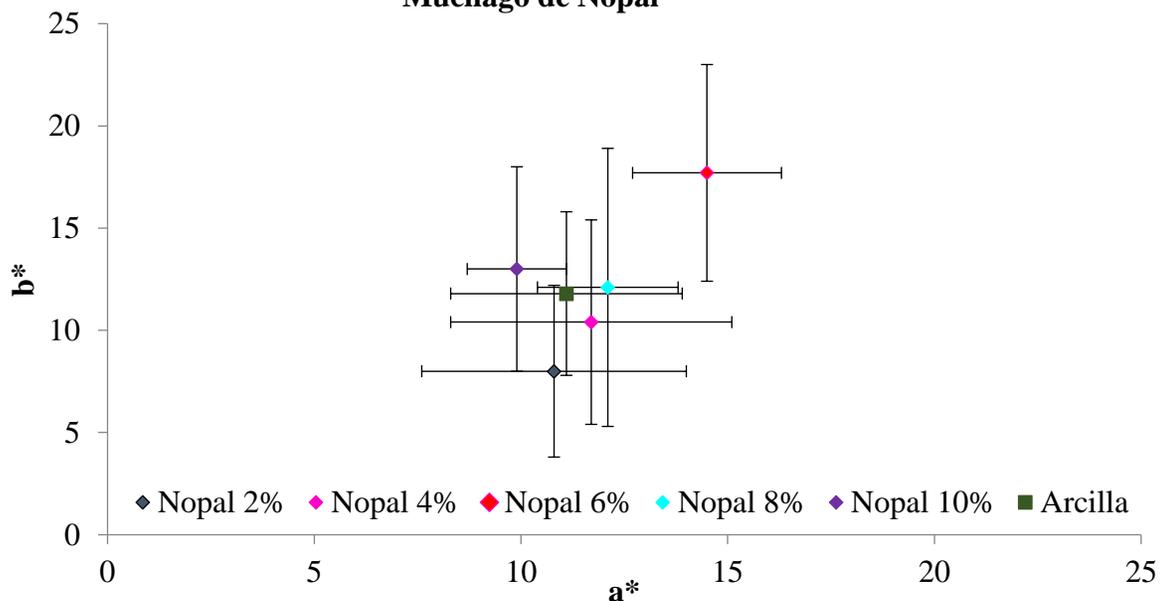


Figura 8. En esta figura se muestran, en promedio, las coordenadas a\* y b\* de las distintas adiciones de mucílago de cactus opuntia blanco, así como también se muestra la posición colorimétrica de la arcilla natural y se esquematiza el tono de estos puntos con el círculo cromático.

La cantidad luminosa del mucílago de nopal es comparable con la de la arcilla; a excepción de la adición del 6 %, que resulta la adición más luminosa de todas las muestras y cuyo valor, incluso con la desviación estándar, resulta superior que el valor medido para la arcilla.

Para las arcillas con adiciones de yeso, sólo la adición del 8 % se encuentra dentro de los rangos de la desviación estándar. En general, las adiciones restantes, ya sea en una (2 y 10 %) o ambas coordenadas (4 y 6 %) se encuentran fuera de este rango. Esto puede verse claramente en la figura 9, en ella, los puntos, en comparación con las figuras anteriores, se encuentran más distantes del punto de la arcilla, por lo que este elemento es el menos parecido colorimétricamente a la arcilla. Las adiciones de yeso son mucho más opacas que la arcilla natural, las de 6, 8 y 10 % tienen cantidades comparables con la medida de la arcilla natural, las concentraciones del 2 y 4 % son más opacas, a pesar de las desviaciones.

Por otra parte, las diferencias colorimétricas entre las distintas concentraciones para cada una de las adiciones se observan en la figura 10. En ella se comparan las coordenadas  $a^*$  (líneas rojas),  $b^*$  (líneas amarillas) y  $L^*$  (líneas grises) de cada porcentaje en comparación con dichas coordenadas de la arcilla natural (líneas punteadas).

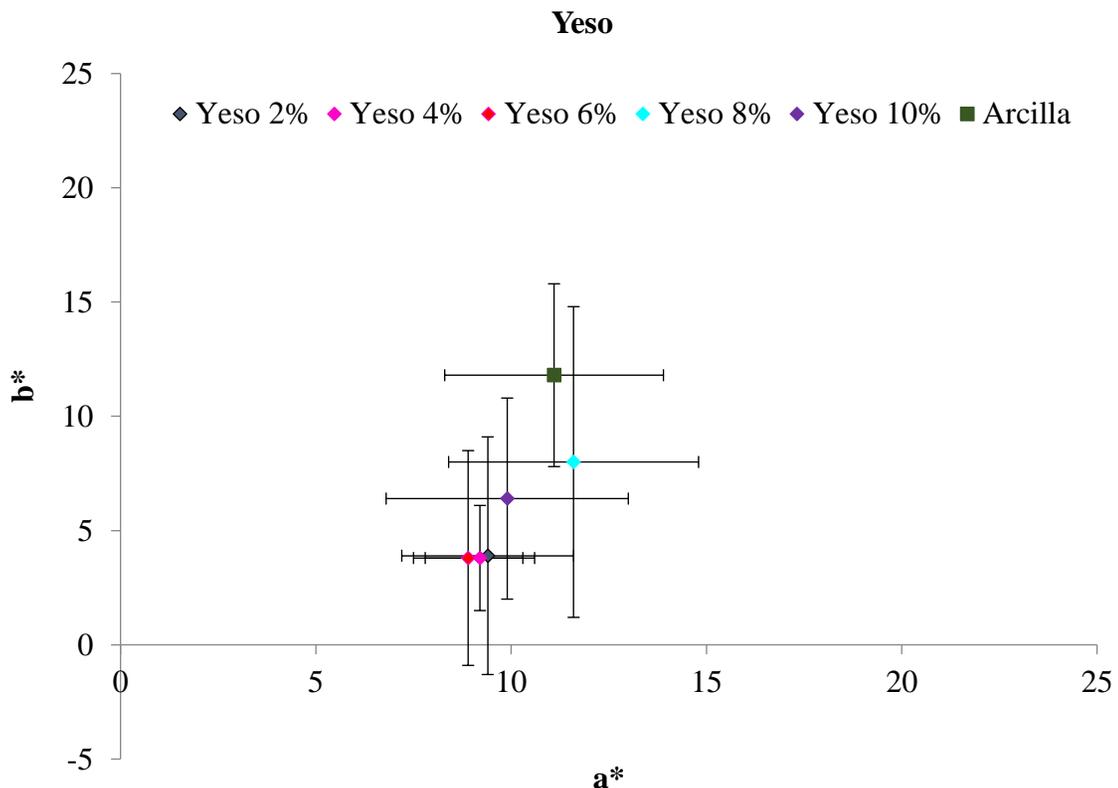


Figura 9. En esta figura se muestran, en promedio, las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  de las distintas adiciones de yeso, así como también se muestra la posición colorimétrica de la arcilla natural y se esquematiza el tono de estos puntos con el círculo cromático.

En la figura 10, se observa que la cantidad de rojo, en las distintas adiciones, toma valores cercanos a los de la arcilla natural; no así en el caso de la luminosidad ni de la cantidad de amarillo de las arcillas modificadas, por lo que son estas coordenadas las que determinarán definitivamente la similitud de una adición con la arcilla natural.

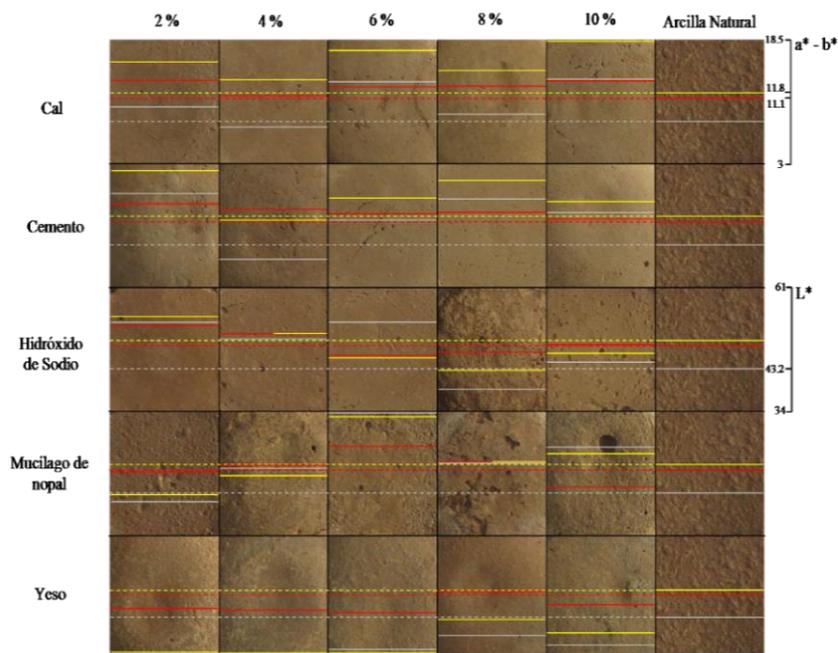


Figura 10. Comparativo entre las distintas concentraciones de las adiciones de los cinco elementos y la arcilla natural.

Visto en este diagrama, se hacen más evidentes las diferencias entre las arcillas con las diferentes adiciones y la arcilla natural. Ninguna de las arcillas con adiciones es cercana a la arcilla base en todas sus coordenadas, pues, en su mayoría, las muestras estudiadas son mucho más luminosas. Este hecho puede deberse que la superficie de los comprimidos es, en mayor o menor medida, más lisa que la superficie de arcilla natural estudiada, por lo que, como antes ya se había mencionado, no sólo es importante considerar las medidas colorimétricas de las adiciones, sino también su textura.

#### 4. CONCLUSIONES

Con base en los análisis de colorimetría realizados con arcillas sin y con adiciones, se establece que las adiciones de cemento portland, hidróxido de sodio y mucílago de nopal son las más parecidas colorimétricamente a la arcilla natural, en lo general. Las medidas colorimétricas de la cal presentan menos similitudes, pero aún pueden dar un color más cercano que el yeso, cuya única similitud en color con el testigo es la adición de 8 % en ambos casos (cal y yeso), pero no cumple totalmente con el matiz. Por tanto, para realizar tratamientos consolidantes de artículos manufacturados con arcilla cruda, es recomendable utilizar, ya sea cemento portland con 6% de adición en peso; hidróxido de sodio con un máximo de 4% de adición o mucílago de nopal con dos porcentajes: 4 % y 8 % de adición, de esta forma, el objeto restaurado conservará, en gran medida, sus propiedades colorimétricas.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de las Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH, así como del CONACYT y de la SEP a través de los proyectos de programas de Redes Temáticas Prodep, Profocie, PFCE. También agradecen el apoyo técnico del Ing. Amado Flores Rentería en la elaboración de las pastillas.

## 6. REFERENCIAS

- Ahmed, A., Keizo, U. (2011), Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum. *Cold Regions Science and Technology*. 66(2 & 3): 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.12.004>
- Ahmed, A., Usama, H. I. (2014), Stability of soft clay soil stabilised with recycled gypsum in a wet environment. *Soils and Foundations*. 54(3):405-416. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.04.009>
- Anikwe, M. A. N., Eze, J. C., Ibudialo, A. N. (2016), Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. *Soil and Tillage Research*. 158: 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.011>
- Flores Ponce, A. (2018), “*Morteros base arcilla, estabilizados con adiciones orgánicas y minerales para su uso patrimonial*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 20-31.
- Benjamin, W. A. (1969), “*Introduction to Crystallography*”. New York, USA, Inc., pp. 83–100.
- Besoain, E. (1985), “*Mineralogía de arcillas de suelos*”. San José, Costa Rica. IICA, pp. 997–1013.
- Carrol, D., Starkey, H. C. (1971), *Reactivity of clay minerals with acids and alkalies*. *Clays and Clay Minerals*. 19: 321-333.
- Cuellar López, A. M. A. (2014), “*Tecnología de Morteros Constructivos de Tierra: una tradición en la vertiente del Lerma Medio en el Epiclásico*”, tesis Maestría Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, pp. 50-125.
- Ma, C., Qin, Z., Zhuang, Y., Chen, L., Chen, B. (2015), *Influence of sodium silicate and promoters on unconfined compressive strength of Portland cement-stabilized clay*. *Soils and Foundations*. 55(5):1222–1232. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.021>
- Dana, E. S., Ford, W. E. (1986), “*Tratado de Mineralogía*”, Editorial Cecsca, Decimotercera Impresión, México, pp. 741-745.
- De León Ambrosio, B. (2017), “*Estabilización De Arcilla Para Uso En Estructuras Patrimoniales: Evaluación De Sus Propiedades Físico-Mecánicas A Edades Tardías*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 50-65.
- Dyson, D. J. (2004), “*X – Ray and Electron Diffraction Studies in Materials Science*”. Londres, Inglaterra. Editorial Maney Publishing, pp. 77–97, 115–134.
- De Aquino, R. E., Marques, J., Costa Campos, M. C., de Oliveira, I. A., de Souza Bahia, A. S. R., Coutrim dos Santo, L. A. (2016), *Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas*, Review Article. *Geoderma*. 262:35-44. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.010>
- Flores Rentería, A. (2010), “*La norma ASTM D 6276 como instrumento de estabilización de suelos para fines patrimoniales*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 15-35.
- Gómez González, M. L. (2008), “*La restauración. Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte*”. 5ª Edición. Madrid, España. Cátedra, pp. 31–37.
- Gupta, D., Kumar, A. (2017), *Performance evaluation of cement-stabilized pond ash-rice husk ashclay mixture as a highway construction material*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 9:159-169. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.010>
- Hotineanu, A., Bouasker, M., Aldaood, A., Al-Mukhtar, M. (2015), *Effect of freeze–thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays*. *Cold Regions Science and Technology*. 119:151-157. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.008>

- Hradil, D., Bezdička, P., Hradilová, J., Vašutová, V. (2016), *Microanalysis of clay-based pigments in paintings by XRD techniques*. *Microchemical Journal*. 125:10-20. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.10.032>
- Johnston Feller, R. (2001), “*Color Science in the Examination of Museum Objects. Non-destructive Procedures*”. California, USA. The Getty Conservation Institute, pp. 15–56.
- Khemissa, M., Mahamedi, A. (2014), *Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay*. *Applied Clay Science*. 95:104-110. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.017>
- Kittel, C. (2005), “*Introduction to Solid State Physics*”. 8ª edición. New Cork, USA. John Wiley & Sons, Inc., pp. 35–39.
- Kuttah, D., Sato, K. (2015), *Review on the effect of gypsum content on soil behavior, Review Article*. *Transportation Geotechnics*. 4:28-37. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.06.003>
- Lamb, T., Bourriau, J. (1995), « *Colour. Art & Science*” (Darwin College Lectures), Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Li, Y., Zhang, H., Tu, C., Song, F., Luo, Y. (2015), *Occurrence of red clay horizon in soil profiles of the Yellow River Delta: Implications for accumulation of heavy metals*. *Journal of Geochemical Exploration*. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.11.006>
- Lin, Y. -H., Hori, Y., Hoshino, S., Miyazawa, C., Kohno, Y., Shibata, M. (2014), *Fluorescent colored material made of clay mineral and phycoerythrin pigment derived from seaweed*. *Dyes and Pigments*. 100:97-103. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2013.08.022>
- López-Lara, T., Zepeda-Garrido, J. A., Castaño, V. M. (1999), *Comparative Study of the effectiveness of different additives on the expansion behavior of clays*. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 4.
- Mahmoudi S., Bennour, A., Meguebli, A., Srasra, E., Zargouni, F. (2016), *Characterization and traditional ceramic application of clays from the Douiret region in South Tunisia*. *Applied Clay Science*. 127 & 128: 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.010>
- Mardani-Aghabaglou A., Kalipcilar, İ., İnan Sezer, G., Sezer, A., Altun, S. (2015), *Freeze–thaw resistance and chloride-ion penetration of cement-stabilized clay exposed to sulfate attack*. *Applied Clay Science*. 115:179-188. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.041>
- Mattone, R. (2005), *Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique*. *Cement and Concrete Composites*. 27 (5) pp :611-616. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.016>
- Modarres A., Nosoudy, Y. M. (2015), *Clay stabilization using coal waste and lime — Technical and environmental impacts*. *Applied Clay Science*. 116 & 117 pp:281-288. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.026>
- Olguin Domínguez, M. A. (2008), “*Efectos mecánicos de la estabilización volumétrica de montmorillonita con CaSO4*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 10-50.
- Özkan, I., Yayla, Z. (2016), *Evaluation of correlation between physical properties and ultrasonic pulse velocity of fired clay samples*. *Ultrasonics*. 66:4-10. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.12.008>
- Hu, Q., Xu, Z., Qiao, S., Haghseresht, F., Wilson, M., Lu, G. Q. (2007), *A novel color removal adsorbent from heterocoagulation of cationic and anionic clays*. *Journal of Colloid and Interface Science*. 308 (1):191-199. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.12.052>
- Rathossi, C., Pontikes, Y. (2010), *Effect of firing temperature and atmosphere on ceramics made of NW Peloponnese clay sediments. Part I: Reaction paths, crystalline phases, microstructure and colour*. *Journal of the European Ceramic Society*. 30(9):1841-1851. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.02.002>

- Sangiorgi C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., Dondi, G. (2016), *Assessment of waste bleaching clay as alternative filler for the production of porous asphalts*. Construction and Building Materials. 109:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.052>
- Valanciene V., Siauciunas, R., Baltusnikaite, J. (2010), *The influence of mineralogical composition on the colour of clay body*. Journal of the European Ceramic Society. 30(7):1609-1617. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.017>
- Vakili, M. V., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., Keramatikerman, M. (2016), *Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag*. Applied Clay Science. 124 & 125:243-251. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.019>
- Velázquez Pérez, J. A. (2015), “*Arqueología experimental en Morteros Base Cal para Uso Patrimonial*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 20-60.
- Viscarra Rossel, R. A., Cattle, S. R., Ortega, A., Fouad, Y. (2009), *In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy*. Geoderma. 150(3 & 4):253-266. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.025>
- Westland, S. © (2017), <http://www.design.leeds.ac.uk/people/stephen-westland/>.
- Wu, Z., Deng, Y., Liu, S., Liu, Q., Chen, Y., Zha, F. (2016), *Strength and micro-structure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin*. Applied Clay Science. 127 & 128:44-51. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.03.040>
- Cao, Y., Guoa, Q., Zhuanga, Y., Yua, Z., Guoa, W., Zhangb, C., Zhub, M., Zhaoa, Q., Ren T., (2017), *Removal of harmful constituents from geothermal water by selected anion clays*. Procedia Earth and Planetary Science. 17:161 – 164. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.041>
- Zak, P., Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., Wu, W., (2016), *The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials*, Construction and Building Materials. 106:179-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.031>
- Zhang, X., Mavroulidou, M., Gunn, M. J. (2015), *Mechanical properties and behaviour of a partially saturated lime-treated, high plasticity clay*. Engineering Geology. 193:320-336. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.007>