



Revista EIA  
ISSN 1794-1237  
e-ISSN 2463-0950  
Año XIX/ Volumen 20/ Edición N.39  
Enero-Junio de 2023  
Reia3921 pp. 1-18

Publicación científica semestral  
Universidad EIA, Envigado, Colombia

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /  
TO REFERENCE THIS ARTICLE /**

Torres Lozada, P.;  
Arango Vallejo, L.; Torres López, W.  
Evaluación del aprovechamiento de  
lodos de plantas de tratamiento de  
agua potable en la preparación de  
adobe como material de construcción  
sostenible.  
Revista EIA, 20(39), Reia3921.  
pp. 1-18.  
<https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1595>

 *Autor de correspondencia:*

Torres Lozada, P. (Patricia)  
Ingeniera sanitaria  
Correo electrónico:  
[patricia.torres@correounivalle.edu.co](mailto:patricia.torres@correounivalle.edu.co)

**Recibido:** 20-01-2022

**Aceptado:** 12-09-2022

**Disponible online:** 01-01-2023

# Evaluación del aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la preparación de adobe como material de construcción sostenible

 PATRICIA TORRES LOZADA<sup>1</sup>

LUIS ANCIZAR ARANGO VALLEJO<sup>1</sup>

WILMAR ALEXANDER TORRES LÓPEZ<sup>1</sup>

1. Universidad del Valle

## Resumen

El adobe es un material de construcción de bajo costo, ampliamente utilizado en diferentes regiones del mundo. Este estudio evaluó la potencial valorización de lodos de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) convencional que usa sulfato de aluminio como coagulante, como reemplazo parcial del suelo (principal componente del adobe).

Las etapas experimentales fueron: *i.* caracterización de lodos estabilizados con Cal (análisis termogravimétrico, pH, densidad real y conductividad eléctrica) y del suelo (determinación del índice de plasticidad - IP, límites líquidos y plásticos y difracción de rayos X-DRx) y en dos condiciones de agregación (suelo grueso y molido); *ii.* producción y caracterización de bloques de adobe (29x15x10 cm<sup>3</sup>), colocados bajo sombra (28 días de curado) y secados hasta peso constante, considerando una humedad menor al 40% y proporciones en peso suelo:lodo estabilizado:cemento portland-OPC definidas aplicando la Metodología de Superficie de Respuesta (lodo estabilizado: 0.0 - 36.4% y OPC: 0.0 - 9.1%) y *iii.* comparación de la resistencia a la compresión (MPa: variable de respuesta del estudio).

El lodo mostró naturaleza silicoaluminosa (65,14% materia no volátil: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en forma de cuarzo, caolinita, gibbsita y goetita), pH 6.34 unidades, densidad real 2,5 g/mL y conductividad 0,62 µs/cm. El IP (≤7.0) del lodo aluminoso lo clasifica como material poco plástico y parcialmente cohesivo. El suelo molido mostró mayor potencial de aprovechamiento del lodo (suelo molido:OPC:lodo 54,5:9,1:36,4 vs suelo grueso:OPC:lodo 90,9:9,1:0,0) con resistencias a la compresión de 6.01 y 2,10 MPa respectivamente.

Estos resultados demuestran la viabilidad de valorización de lodos aluminosos de PTAP estabilizados con cal y molidos para producción de adobe, contribuyendo a una producción más sustentable y amigable con el ambiente al reducir el uso de materiales como el suelo.

**Palabras clave:** adobe, lodos de agua potable, materiales de construcción, materiales sostenibles, resistencia a la compresión

# Evaluation of the use of drinking water treatment plants sludges in the preparation of adobe as a sustainable construction material

## Abstract

Adobe is a low-cost building material, widely used in different regions of the world. This study evaluated the potential recovery of sludge from a conventional drinking water treatment plant (DWTP) that uses aluminum sulfate as a coagulant, as a partial replacement of the soil (the main component of adobe).

The experimental stages were *i.* characterization of lime stabilized sludge (thermogravimetric analysis, pH, real density and electrical conductivity) and soil (determination of the plasticity index - PI, liquid and plastic limits and X-ray diffraction-DRx) and in two aggregation conditions (soil coarse and ground); *ii.* production and characterization of adobe blocks (29x15x10 cm<sup>3</sup>), placed under shade (28 days of curing) and dried to constant weight, considering a humidity lower than 40% and proportions in weight soil:stabilized sludge:portland-OPC cement defined by the Response Surface Methodology (stabilized sludge: 0.0 - 36.4% and OPC: 0.0 - 9.1%) and *iii.* comparison of compressive strength (MPa: study response variable).

The sludge showed silicoaluminous nature (65.14% non-volatile matter: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the form of quartz, kaolinite, gibbsite and goethite), pH 6.34 units, real density 2.5 g/mL and conductivity 0.62 μs/cm. The IP (≤7.0) classifies the aluminous sludge as not very plastic and partially cohesive material. The ground soil showed greater potential for using the sludge (ground soil: OPC: mud 54.5: 9.1: 36.4 vs coarse soil: OPC: mud 90.9: 9.1: 0.0) with resistance to compression of 6.01 and 2.10 MPa respectively.

These results demonstrate the viability of valorization of DWTP aluminous sludge stabilized with lime and ground for adobe production, contributing to a more sustainable and environmentally friendly production by reducing the use of materials such as soil.

**Keywords:** adobe, drinking water sludge, building materials, sustainable materials, compressive strength

## 1. Introducción

La configuración predominante de las Plantas de Tratamiento de Agua Potable - PTAP son las de tipo Convencional o Completo, conformadas por las etapas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y ajuste de pH. De acuerdo con el Sistema Único de Información de Servicios Públicos (2010), aproximadamente el 81% de los Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable (SAAP) en Colombia utilizan esta modalidad de tratamiento, en la cual se generan cantidades

importantes de lodos que se concentran principalmente en la etapa de sedimentación y las características de calidad y cantidad de los mismos, dependen tanto de las características del agua cruda (material coloidal, sustancias húmicas, además de contaminantes orgánicos e inorgánicos, entre otros elementos), como de las condiciones de coagulación en que normalmente se usan sales de aluminio o de hierro como coagulantes primarios y en algunos casos, polímeros naturales o químicos como ayudantes de coagulación (Babatunde & Zhao, 2007; Gang et al., 2010; Spinosa, 2013).

Una característica que a su vez es la mayor dificultad del manejo para la disposición y el aprovechamiento de estos lodos, es el alto contenido de humedad, además de la alta resistencia a la deshidratación mecánica (Lee et al., 2005; Torres et al., 2012). Los lodos de PTAP son considerados residuos y aunque disponerlos en rellenos sanitarios o en cuerpos de agua superficial puede constituir una potencial amenaza para la biota de los ecosistemas por su alto contenido de aluminio o hierro (procedentes del coagulante), en la mayoría de los países ésta aún es una práctica frecuente (Zhao et al., 2009). Sin embargo, aspectos como normas más restrictivas, altos costos de recolección, transporte y disposición final, han llamado la atención en la búsqueda de soluciones económicas e inteligentes para el uso y manejo más sostenible y amigable con el ambiente, motivando estudios que potencialicen el aprovechamiento de este material (Babatunde & Zhao, 2007; Januário & Ferreira, 2009).

Entre las experiencias de valorización de lodos de PTAP, se destaca su potencial aplicación particularmente en el sector de la construcción, en que se encuentra la evaluación de su uso como componente en la fabricación de diferentes materiales como hormigón, morteros de cemento, materiales de arcilla, productos cerámicos, ladrillos, tuberías y azulejos (Cerón et al., 2006; Ramírez & Mendoza, 2008; Walsh et al., 2008; Torres et al., 2012; Victoria, 2013). Estas prácticas pueden aportar beneficios para el manejo ambiental y seguro de residuos potencialmente peligrosos, la reducción de la contaminación causada por el vertimiento a cuerpos de agua, menores costos de energía, transporte y fabricación y un menor uso de recursos naturales.

El adobe es uno de los materiales de bajo costo a nivel local y mundial más utilizados tanto en la construcción de viviendas como en fortalezas, palacios y obras religiosas (Riveros, 2007; Zuleta, 2011). Este material presenta ventajas como: *i.* el material con el que se

fabrica se encuentra de manera local; *ii.* no se requiere mano de obra especializada; *iii.* las técnicas de producción no requieren elevada inversión, ni equipos industriales, entre otros (Morales Domínguez et al., 2007).

En la fabricación de este material en general el suelo es el principal constituyente; adicionalmente, en algunos casos se incorpora cemento portland (Chen, 2009) y en otros arena (cuya proporción en el suelo debe ser del orden de 40-60%, dado que un exceso de ésta contribuiría a una mayor porosidad, disminuyendo la cohesión y la resistencia mecánica de la mezcla (Rodríguez & Saroza, 2006; Goodary et al., 2012).

Teniendo en cuenta que el uso de este tipo de materiales de construcción puede aportar a reducir el déficit de vivienda y mejorar el hábitat de manera sostenible, en este trabajo se muestran los resultados de la evaluación del potencial de aprovechamiento de lodos aluminosos procedentes de una PTAP convencional, como reemplazo parcial del suelo en la producción de adobe.

## 2. Metodología

### *Características del lodo generado en la PTAP y los materiales constitutivos de los bloques de Adobe*

El estudio se realizó con lodos de una PTAP convencional, en que la coagulación química se realiza con sulfato de aluminio y maneja caudales entre 0,800 y 1,100 m<sup>3</sup>/s. La recolección de las muestras de lodo se realizó en las unidades de sedimentación por muestreo sistemático lineal, en espacio y tiempo al azar, a muestras compuestas y heterogéneas (IDEAM, 2007). Los lodos aluminosos se caracterizaron en términos de análisis físicos (termogravimétrico, pH, densidad real y conductividad eléctrica) realizados sobre 7 muestras secas a 105°C por 24 horas (Carretero León & Pozo Rodríguez, 2007).

El suelo provenía de una localidad en que es común el uso de este material y tanto al lodo como al suelo, se les determinaron los límites líquido y plástico y el índice de plasticidad (ASTM, 2000) y los difractogramas (DRx) (Carretero León & Pozo Rodríguez, 2007). Adicionalmente, el suelo fue evaluado en dos estados de agregación

(grueso y molido mediante molinos de discos, a los que se les determinó su distribución granulométrica mediante tamices (NTC, 1522; Le Runigo et al., 2011).

Además del suelo y el lodo, se usó cemento portland tipo I (Chen & Lin, 2009) y de acuerdo con recomendaciones de Samp Pedro Rodríguez & Gallego Medina, (2004), el lodo fue estabilizado con cal viva granulada (a la cual se le practicó análisis químico para CaO total (Carretero León & Pozo Rodríguez, 2007).

### Elaboración de bloques de Adobe

Se conformaron bloques de adobe de 29 cm x 15 cm x 10 cm (Le Runigo et al., 2011; Álvarez Ramírez et al., 2012; Anggraini et al., 2015) con mezclas en diferentes proporciones de suelo (tanto grueso como molido), lodo aluminoso y cemento portland (OPC) considerando, además, que la humedad no excediera el 40% (Morales Domínguez et al., 2007). Los bloques se colocaron bajo sombra a cielo abierto por 28 días de curado y secados hasta peso constante (Al-Mukhtar, 2012). Las proporciones de mezclas se definieron aplicando la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR: Tabla 1) y se aplicó agua; esta mezcla se amasó y mezcló manualmente hasta formar una argamasa homogénea, la cual se porcionó y con ayuda de una bloquera CINVA RAM (Barrios et al., 1986), se conformaron los bloques de adobe.

**Tabla 1.** Proporciones de componentes para la conformación de los bloques de adobe

Componentes	No. Mezclas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
% Suelo*	60,6	62,4	100,0	95,2	66,7	80,0	90,9	77,0	73,0
% Lodo aluminoso	36,4	31,3	0,0	0,0	33,3	20,0	0	19,2	18,2
% OPC**	3,0	6,3	0,0	4,8	0,0	0,0	9,1	3,8	8,8

\* Mezclas conformadas tanto con suelo grueso como molido; \*\*cemento portland (Horpibulsuk et al., 2010; Goodary et al., 2012)

## Comparación de la Resistencia a la compresión como variable de respuesta

Para identificar las regiones en las que se maximizó la resistencia a la compresión (MPa) (variable de respuesta) de los bloques de adobe fabricados, se aplicó el modelo estadístico representado por la Ec. 1.

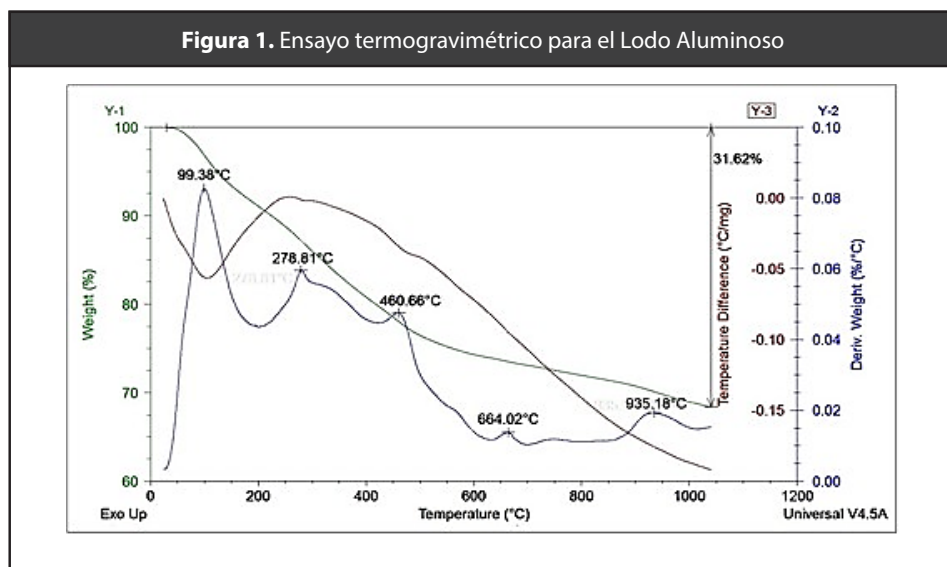
$$\text{Resistencia media} = b_0 + b_1\text{OPC} + b_2\text{Lodo} + b_3\text{OPC} * \text{Lodo} + b_4\text{OPC}^2 + b_5\text{Lodo}^2 \text{ (Ec. 1)}$$

Donde  $b_0$  es el intercepto,  $b_1$  y  $b_2$  son los coeficientes asociados al efecto lineal de los variables explicativas,  $b_3$  es el coeficiente de interacción entre las variables explicativas consideradas,  $b_4$  y  $b_5$  son los coeficientes asociados al efecto cuadrático de las variables explicativas sobre la resistencia a la compresión de los bloques de adobe elaborados. Se evaluó la significancia de los coeficientes de regresión mediante un análisis de varianza (Anova) y se elaboraron las gráficas de superficie y contornos, empleando el software estadístico R versión 4.0.2.

### 3. Resultados y discusión

#### Características del lodo generado en la PTAP y los materiales constitutivos de los bloques de Adobe

La Figura 1 muestra los resultados del ensayo termogravimétrico del lodo aluminoso, en la cual se observa una pérdida de peso de 31,62% y se aprecian cinco picos: el primero ubicado a los 99,38°C, relativo a la pérdida de agua capilar; el segundo localizado a los 278°C aproximadamente, tiene que ver probablemente con la deshidroxilación de los hidróxidos de aluminio y de hierro presentes en el lodo, lo que coincide con lo encontrado por Torres et al., (2011) en la evaluación de los lodos aluminosos de una PTAP convencional con sulfato de aluminio como coagulante; el tercer pico, que se ubica a los 460°C, se relaciona con la descomposición de la materia orgánica y deshidroxilación de componentes arcillosos (Barba, 1997; Torres et al., 2011); el cuarto pico localizado a los 664°C aproximadamente, se relaciona con la descomposición de carbonatos de calcio y magnesio y el quinto, que está a 935°C, probablemente tiene que ver con alguna transformación de la fase arcillosa del lodo (Millogo et al., 2008).



El pH (6.34 unidades), la densidad real (2,5 g/mL) y la conductividad (0,62  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) de los lodos aluminosos de la PTAP, presentaron un comportamiento similar al reportado por Ceron et al., (2006).

La Tabla 2 muestra los límites líquido y plástico y el índice de plasticidad (IP) del lodo aluminoso y el suelo; el IP del lodo inferior a 7.0, lo clasifica como un material poco plástico y parcialmente cohesivo, similar a lo encontrado por Mejía & Delvasto, (1998) sobre la caracterización de lodos de PTAP.

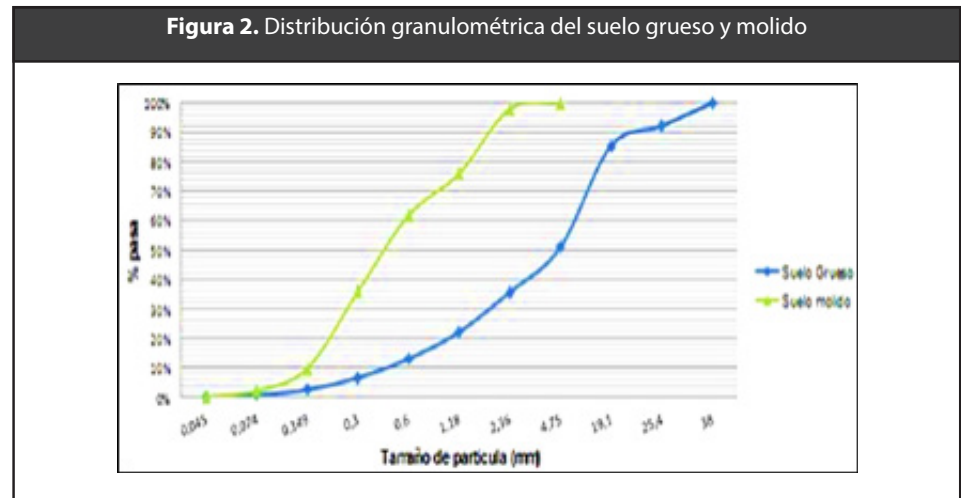
**Tabla 2. Ensayos del Índice de Plasticidad al lodo y al suelo**

Parámetro	Lodo Aluminoso	Suelo
Límite líquido (L.L) %*	85	63.5
Límite plástico (L.P) %	79,5	37.8
<b>Índice de plasticidad (I.P) %</b>	5,5	25.7

\*LL = LP + IP

Con relación a la granulometría del suelo, la Figura 2 muestra las distribuciones granulométricas en los dos estados de agregación evaluados (grueso y molido), en la que se puede apreciar cómo la mediana (proporción del 50% de las partículas) de la distribución se reduce conforme el régimen de molienda del suelo es más severo.

Mientras para el suelo grueso o sin moler, el 50% de las partículas miden menos de 4,75 mm, para el suelo molido el tamaño de las partículas es inferior a 0,60 mm, lo que representa cerca de un 87% menor que el tamaño de partícula del suelo grueso, lo que de acuerdo con autores como Sampedro Rodríguez & Gallego Medina, (2004) indica que el suelo molido presenta mejores características para la elaboración del adobe.



Con relación a los difractogramas ( $DR_x$ ) del lodo aluminoso y del suelo (Figuras 3 y 4 respectivamente), en la primera se distinguen picos intensos característicos correspondientes al Cuarzo (Q:  $SiO_2$ ) y la Caolinita (K:  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ) y por la naturaleza de lodo aluminoso, además hay presencia de arcillas (semejante al suelo) y formas hidratadas de óxidos de hierro y aluminio, como la Gibsita (G:  $Al(OH)_3$ ) y Goethita (Go:  $FeO(OH)$ ) [19], provenientes de los fenómenos químicos asociados a la coagulación y floculación [39]. En la Figura 4, se puede apreciar la predominancia de materiales como el Cuarzo y la Caolinita. Estas características similares entre las características del lodo aluminoso y del suelo, permiten establecer a los lodos aluminosos como un material con potencial de ser utilizado como agregado en la producción de bloques de adobe, en reemplazo parcial del suelo.



Figura 3. Difractograma Lodo aluminoso seca

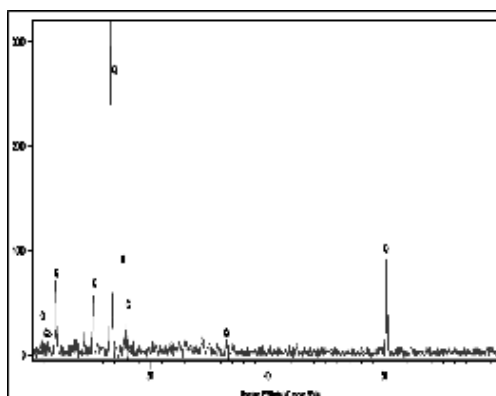
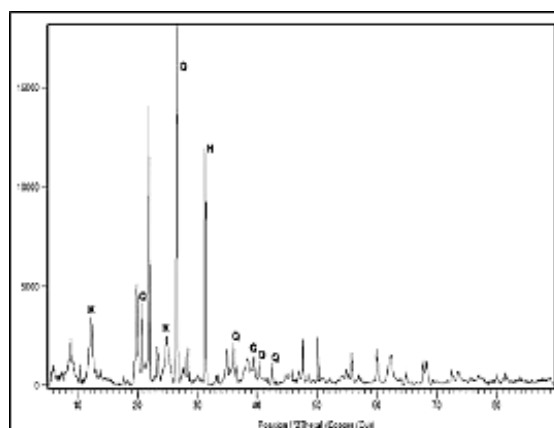


Figura 4. Difractograma suelo



Q: Cuarzo, K: Caolinita, H: Hematita, G: Gibsita, Go: Goethita

Autores como Álvarez Ramírez et al., (2012); Al-Mukhtar et al., (2012) y Anggraini, (2015), indican que la incorporación de cal al lodo, además de eliminar los agentes patógenos, mejora las propiedades mecánicas y de durabilidad de los bloques de adobe, al proporcionar las condiciones químicas de pH y concentración de iones  $Ca^{+2}$  al lodo, que permitan que al interactuar con los componentes sílico-aluminosos del suelo, ocurra la formación de compuestos químicos como silicatos cálcicos hidratados (CSH) y aluminatos cálcicos hidratados (ACH) que proporcionen estabilidad ante la humedad a los bloques de adobe (Sampedro Rodríguez & Gallego Medina, 2004; Torres et al., 2011; Miqueleiz, (2012).

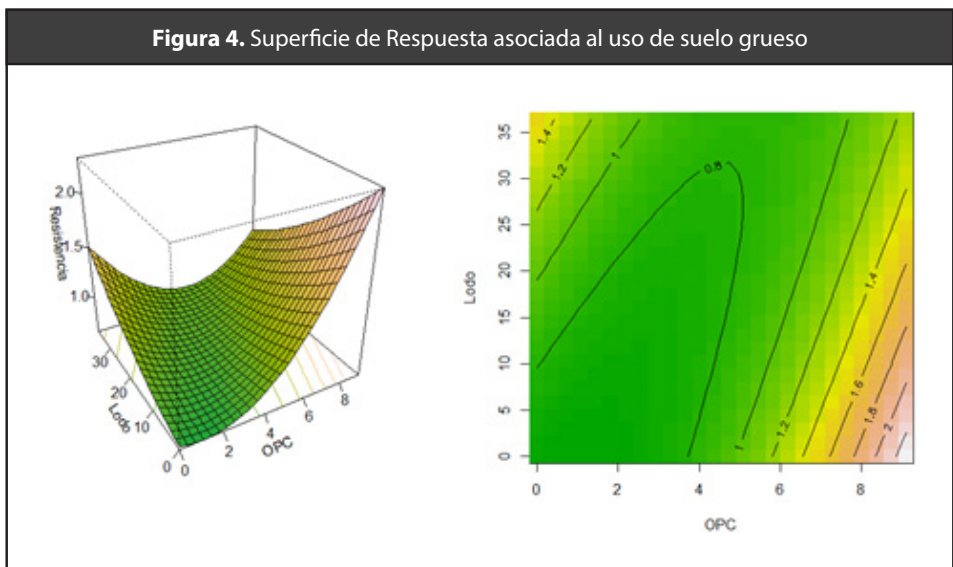
La Tabla 3 muestra la composición química de la cal viva empleada, en la cual se observa un contenido de óxidos de calcio y magnesio ( $C_aO + M_gO$ ) del orden de 92%. De acuerdo con Andreoli et al., (2001) recomienda para el caso de lodos provenientes de PTAP, que el tiempo transcurrido entre la aplicación de la cal viva y la manipulación de los lodos en la elaboración de los bloques de adobe, esté entre 20 y 90 días.

**Tabla 3.** Composición química de la Cal

Compuesto y/o Elemento	% en peso	Compuesto y/o Elemento	% en peso
SiO <sub>2</sub>	2,67	K <sub>2</sub> O	0,11
Na <sub>2</sub> O	0,07	TiO <sub>2</sub>	0,12
CaO (Total)	67,01	MnO	0,12
MgO	12,39	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,20	SrO	0,05
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	ZnO	<0,01
SO <sub>3</sub>	0,54		

### Características de los Bloques de Adobe

La Figura 4 muestra la superficie de respuesta asociada a la conformación de los bloques de adobe con incorporación del suelo grueso y la Tabla 4 muestra los resultados del análisis de varianza. La resistencia a la compresión del bloque conformado solo por suelo grueso, presentó un valor de 0.65 MPa; en esta condición de suelo, los valores óptimos se encontraron en el extremo inferior derecho de la Figura, en que la mayor resistencia a la compresión fue del orden de 2,1 MPa.



**Tabla 4. Análisis de varianza Experimento con Suelo Grueso**

Características del Modelo		GL*	Contribución	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Valor-P
		5	69,30%	6,720	1,344	10,84	0
<b>Lineal</b>	Lodo	2	20,42%	1,663	0,832	6,71	0,005
	OPC	1	11,35%	0,022	0,022	0,18	0,679
<b>Cuadrático</b>		1	9,07%	1,073	1,073	8,65	0,007
		2	45,52%	0,973	0,486	3,92	0,034
	Lodo:Lodo	1	7,77%	0,033	0,033	0,26	0,613
	OPC:OPC	1	37,75%	0,895	0,895	7,21	0,013
<b>Interacción</b>		1	3,36%	0,326	0,326	2,63	0,118
	Lodo:OPC	1	3,36%	0,326	0,326	2,63	0,118
<b>Error</b>		24	30,70%	2,977	0,124		
	Falta de ajuste	2	8,30%	0,805	0,402	4,08	0,031
	Error puro	22	22,40%	2,172	0,099		
<b>Total</b>		29	100,00%	9,697			
<b>Resumen del Modelo</b>	S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (adj)	R <sup>2</sup> (pred)			
		0,352182	69,30%	62,91%	48,63%		

\*GL: grados de libertad

Se observa que en el caso del suelo grueso, la componente de interacción (%OPC\*%Lodo aluminoso) no tiene un efecto significativo (F-valor: 2,63, p-valor: 0,118), lo cual sugiere que bajo las condiciones experimentales no se presentó sinergia entre el efecto conjunto de estos dos componentes sobre la resistencia a la compresión; sin embargo, las componentes lineales y cuadráticas del modelo, evidencian un mayor efecto del OPC (p-valor: 0,007 y 0,013 respectivamente) en comparación con el porcentaje de lodo (p-valor: 0,679 y 0,613 respectivamente).

Por esta razón, la mejor condición en términos de la resistencia a la compresión se alcanzó con los más altos porcentajes de OPC (9,1%) y los menores porcentajes de lodo (0,0%). La variabilidad de la resistencia a la compresión con suelo grueso es explicada en un  $R^2=69,30\%$  por el %OPC y el %lodo, siendo la variación explicada por componentes diferentes a los anteriores (error) de 30,70%.

Con relación al Suelo Molido, la Figura 5 muestra la superficie de respuesta asociada a la conformación de los bloques de adobe con incorporación del suelo molido y la Tabla 5 muestra los resultados del análisis de varianza. El primer aspecto a destacar es que solo la aplicación de la molienda a suelo, mejoró las características del adobe, aumentando su resistencia a la compresión de 0.65 con suelo grueso a 4.54 MPa con suelo molido, valor que logró aumentarse con la mezcla de suelo molido con OPC y con lodo; así, los valores óptimos se encontraron en el extremo superior derecho de la Figura 5, encontrándose que la mayor resistencia a la compresión se obtiene con los más altos porcentajes de OPC y de lodo aluminoso.

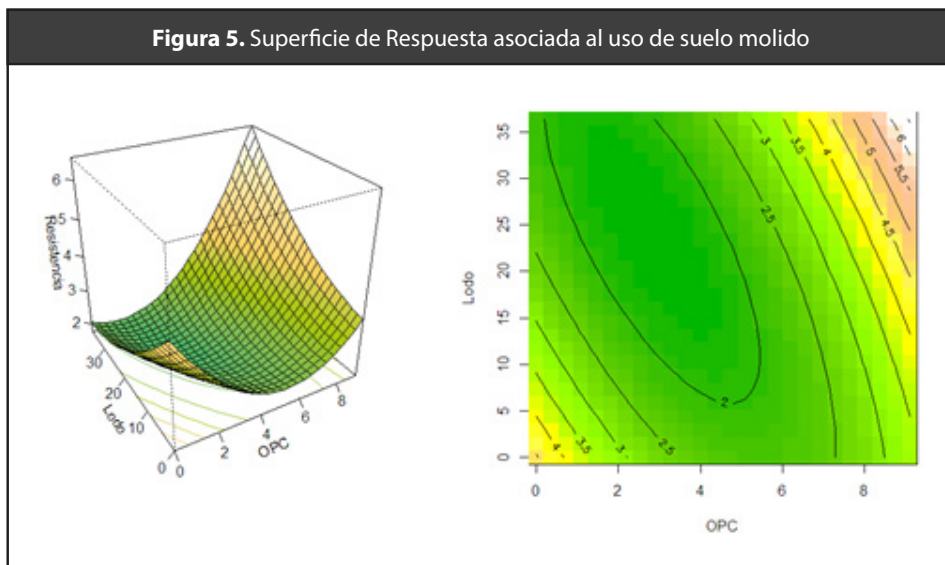


Tabla 5. Análisis de varianza Experimento con Suelo Molido

Características del Modelo	Fuente	GL*	Contribución	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Valor P
<b>Lineal</b>		5	91,16%	17,930	3,586	49,48	0,000
		2	45,68%	6,820	3,410	47,05	0,000
	Lodo	1	3,34%	0,282	0,282	3,89	0,060
	OPC	1	42,34%	6,151	6,151	84,88	0,000
<b>Cuadrático</b>		2	30,73%	8,802	4,401	60,73	0,000
	Lodo:Lodo	1	0,07%	0,958	0,958	13,23	0,001
	OPC:OPC	1	30,66%	8,642	8,642	119,26	0,000
<b>Interacción</b>		1	14,75%	2,902	2,902	40,04	0,000
	Lodo:OPC	1	14,75%	2,902	2,902	40,04	0,000
<b>Error</b>		24	8,84%	1,739	0,072		
	Falta de ajuste	2	0,08%	0,016	0,008	0,1	0,904
	Error puro	22	8,76%	1,723	0,08		
<b>Total</b>		29	100,00%	19,669			
<b>Resumen del Modelo</b>	S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (adj)	R <sup>2</sup> (pred)			
	0,269197	91,16%	89,32%	86,59%			

\*GL: grados de libertad

Con un OPC de 9,1% y 36,4% de lodo, se alcanzaron valores de resistencia a la compresión casi tres veces mayores a lo encontrado con suelo grueso, del orden de 6,55 MPa. A diferencia del suelo grueso, con el suelo molido se alcanzaron valores mucho mayores del  $R^2$ , lo que indica que el OPC y el Lodo permiten explicar mejor el comportamiento de la resistencia a la compresión para suelo molido que para suelo grueso. Esta baja correlación con el suelo grueso, sugiere la posibilidad de evaluar otras proporciones de mezcla con menores proporciones de suelo grueso.

La Tabla 6 sintetiza las condiciones óptimas de mezcla con el uso de ambas granulometrías de suelo (grueso y molido) y las resistencias a la compresión alcanzadas en cada caso.

<b>Tabla 6. Condiciones óptimas alcanzadas con suelo grueso y molido</b>		
<b>Resumen</b>	<b>Suelo Grueso:OPC:Lodo aluminoso</b>	<b>Suelo Molido:OPC:Lodo aluminoso</b>
<b>Proporción (%)</b>	90,9: 9,1: 0,0	54,5: 9,1: 36,4
<b>Resistencia a la Compresión (MPa)</b>	2,3	6,55

Estos resultados ratifican la influencia de la granulometría del suelo, siendo más favorable el suelo molido que el grueso, ya que se alcanzan mayores niveles de Resistencia a la compresión.

Desde el punto de vista de la potencial aplicación de los lodos aluminosos, los resultados evidencian que es posible incorporar cantidades importantes de los mismos, favoreciendo la opción de preparación de materiales más sostenibles y amigables con el ambiente por la reducción en el uso de suelos que pueden ser reemplazados por un residuo como los lodos aluminosos. Sin embargo, el suelo molido garantiza un mayor potencial de aplicación de los lodos, además de que el adobe producido en estas condiciones consigue alcanzar una mayor resistencia a la compresión que los bloques de adobe conformados solo con suelo, lo que es una variable de vital importancia en el sector de la construcción.

En las condiciones alcanzadas, el adobe preparado con suelo grueso solo podría usarse en muros divisorios sin carga, mientras el el adobe preparado con suelo molido podría ser usado en muros divisorios con carga (ICONTEC, 2004; Arango Ocampo & Trujillo Velásquez, 2014). Adicionalmente, el lodo aluminoso muestra potencial de ser incorporado como una de las estrategias de mejoramiento de las cualidades de este material.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

Los lodos aluminosos provenientes de la etapa de sedimentación de plantas convencionales de tratamiento de agua potable, son coherentes con la naturaleza silicoaluminosa del suelo usado en este estudio, puesto que el 65,14% de la materia no volátil del lodo está compuesta por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , que se encuentran en forma de Cuarzo, Caolinita, Gibsita y Goethita. Estas características indican que este material presenta condiciones propicias para ser un componente de uso potencial en la construcción de bloques de adobe.

La granulometría del suelo mostró un efecto importante sobre las características de resistencia a la compresión; mientras en bloques de adobe fabricados con suelo grueso no fue viable incorporar lodos aluminosos (proporción óptima alcanzada suelo grueso:OPC:lodo aluminoso - 90,9:9,1:0,0 con máxima resistencia a la compresión del orden de 2,1 MPa), con el suelo molido se alcanzaron mejores condiciones tanto desde el punto de vista de mayor porcentaje de uso de lodos (suelo molido:OPC:lodo aluminoso de 54,5: 9,1: 36,4) como de mayor resistencia a la compresión (del orden de 6 MPa), lo que potencializa el uso de estos lodos en el sector de la construcción.

Es importante continuar estudiando la posibilidad de incorporar lodos aluminosos en la conformación de materiales de construcción sostenibles como los bloques de adobe, ya que es una alternativa que contribuye a minimizar los impactos negativos al ambiente y a la salud asociados a la disposición de éstos en cuerpos de agua. Además, se reduciría el uso de recursos naturales como el suelo. Para la elaboración de bloques de adobe con lodos aluminosos, se recomienda optimizar la deshidratación, ya que éstos se encuentran expandidos y la humedad constituye un factor crítico (agua atrapada en su estructura), el cual puede incrementar la porosidad de los bloques y disminuir la resistencia a la compresión.

## 5. Referencias

- Al-Mukhtar, M., Khattab, S. & Alcover, J. F. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, vol. 139, pp. 17-27. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.04.004
- Álvarez Ramírez R., Montes García P, Martínez Reyes J., Altamirano Juárez D, C. & Gochi Ponce, Y. (2012). The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Material*, vol. 34, pp. 296-30. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072
- Andreoli, C. V., Ferreira, A. C., Cherubini, C., Rodrigues, C., Carneiro, C. & Fernandes, F. (2001). Higienização do lodo de esgoto. Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos (87-117). Brasil: Abes - Prosab.
- Angraini, V., Asadi, A., Huat Bujang, B.K. & Nahazanan, H. (2015). Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. *Measurement*, vol. 59, pp. 372-381. DOI:10.1016/j.measurement.2014.09.059
- Annual Book of ASTM Standards. ASTM, 5080. (2000). Standard Test Method for Apparent Density. American Society for Testing and Materials.
- Arango Ocampo, N., & Trujillo Velásquez, J. (2014). Análisis comparativo del ciclo de vida del bloque de suelo cemento (BSC) vs el bloque de concreto tradicional, Tesis Doctoral, Escuela de ingeniera, Universidad EIA, Colombia.
- Babatunde, A. O. & Zhao, Y. Q. Constructive approaches towards water treatment works sludge management : an international review of beneficial re-uses. (2007) *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 129-164. DOI: 10.1080/10643380600776239
- Barba, A. Materias Primas para la Fabricación de Soportes de Baldosas Cerámicas. (1997). Instituto de Tecnología Cerámica, pág 291. Instituto de Tecnología Cerámica.
- Barrios, G., Alvarez, L., Arcos, H., Marchant, E. & Rosi, D. (1986). Comportamiento de los suelos para la confección de adobes. *Informes de la Construcción*, vol. 37, no. 377, pp. 43-49.
- Carretero León, M. I. & Pozo Rodriguez, M. (2007). Mineralogía aplicada, salud y medio ambiente, Madrid, España: Editorial Paraninfo, pág 407.
- Cerón, O., Millán, S., Espejel, F., Rodríguez, A. & Ramírez, R. M. (2006). Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar materiales de construcción. México: Univesidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería Ambiental, pp. 1-11.
- Chen, L. & Lin, D.-F. (2009). Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 162, no. 1, 321-327. DOI : 10.1016/j.enggeo.2010.12.002
- Januário, G. F. & Ferreira Filho, S. S. (2007). Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, vol. 12, no. 2, pp. 117-126.
- Gang, Z., Ting-lin, H., Zhan-peng, L., & Chi, T. (2010). Full scale evaluation on ferric flocs sludge treatment with pelleting flocculation blanket process. In 2010 International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering, vol. 1, pp. 193-196. DOI: 10.1109/CESCE.2010.129
- Goodary R., Lecomte Nana G.L., Petit C. & Smith D.S. (2012). Investigation of the strength development in cement-stabilised soils of volcanic origin. *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 592-598. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.054



- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y. & Suddeepong, A. (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 2011-2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004). Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega. NTC 5324. Bogotá: ICONTEC. pp. 1-42.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, & Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial - IDEAM. (2007). Resolución No. 0062. Por la cual se adoptan los protocolos de muestreo y análisis de laboratorio para la caracterización fisicoquímica de los residuos o desechos peligrosos en el país. Bogotá D.C.: Los autores.
- Le Runigo, B., Ferber, V., Cui, Y. J., Cuisinier, O. & Deneele, D. (2011). Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions. *Engineering Geology*, vol. 118, no. 1, pp. 20-28.
- Lee, D.-J., Tay, J.-H., Hung, Y.-T. & He, P. (2005). Introduction to Sludge Treatment. En L. Wang, Y.-T. Hung & N. Shamma (Eds.), *Physicochemical Treatment Processes* Humana Press. Tomo. 3, pp. 677-703.
- Martínez Córdova, M. V. (2012). Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable. (Ingeniería Química Pregrado), Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Mejía, R. & Delvasto, S. (1998). Aprovechamiento de Lodo Aluminoso Generado en el Proceso de Potabilización del Agua. Cali: EMCALI EICE ESP - Universidad del Valle.
- Millogo, Y., Hajjaji, M., & Ouedraogo, R. Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. (2008). *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 2386-2392. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.09.002
- Miqueleiz, L., Ramírez, F., Seco, A., Nidzam, R. M., Kinuthia, J. M., Tair, A. A. & Garcia, R. (2012). The use of stabilised Spanish clay soil for sustainable construction materials. *Engineering Geology*, vol. 133. pp. 9-15. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.02.010
- Norma Técnica Colombiana NTC 1522. Suelos. Ensayo para determinar la granulometría por tamizado.
- Ramírez, P. & Mendoza, A. (2008). Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo S. d. M. A. y. R. N. (SEMARNAT) (Ed.) *La experiencia en México*.
- Riveros, S. (2007). El uso masivo de la tierra como material de construcción. *Apuntes Universidad Javeriana*, vol. 20, no. 2, pp. 354-363.
- Rodríguez, M. A. & Saroza, B. (2006). Identificación de la composición óptima del adobe como material de construcción de una escuela en Cuba. *Materiales de Construcción*, vol. 56, no. 282, pp. 53-62.
- Sampedro Rodríguez, A. & Gallego Medina, J. (2004). De cal y carreteras. *Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, vol. 135, 6-21.
- Sistema Único de Información de Servicios Públicos - SUI. (2010). Reportes Sección Técnico Operativo-Plantas de potabilización. [En línea]. Disponible en: [http://reportes.sui.gov.co/reportes/SUI\\_ReporteAcueducto.htm](http://reportes.sui.gov.co/reportes/SUI_ReporteAcueducto.htm)
- Spinosa, L. (2013). Characterization: a necessary tool in sludge management. *Water Science and Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 748-755. DOI: 10.2166/wst.2013.338
- Torres, P., Hernández, D. & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 27, no. 3, pp. 145-154. DOI: 10.4067/S0718-50732012000300003

- Torres, J., Mejía de Gutiérrez, R., Castelló, R. & Vizcayno, C. (2011). Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 1, no. 31, 35 – 43.
- Victoria, A. N. (2013). Characterisation and performance evaluation of water works sludge as bricks material. *International Journal of Engineering*, vol. 3, no. 3,p. 8269.
- Walsh, M. E., Lake, C. B., & Gagnon, G. A. (2008). Strategic pathways for the sustainable management of water treatment plant residuals. *Journal of Environmental Engineering and Science*, vol. 7, no. 1, 45-52. DOI:10.1139/S07-034
- Zhao, Y. Q., Zhao, X. H. & Babatunde, A. O. (2009). Use of dewatered alum sludge as main substrate in treatment reed bed receiving agricultural wastewater: Long-term trial. *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 2, pp. 644-648.
- Zuleta, G. (2011). La Arquitectura en Tierra: una Alternativa para la Construcción Sostenible. *Revista Hábitat Sustentable*, vol. 1, no. 1, pp. 35- 39.