



Comportamiento de limos mezclados con lodos ricos en diatomeas y materia orgánica

Behavior of silts mixed with sludge rich in diatoms and organic matter content

Francisca, Franco M. ^{1,2} ✉ - Bertolino, Silvana ^{1,2} - Camara, Osvaldo ^{1,2} - Van de Velde, Germán ²

Recibido: 25 de julio de 2012 • Aceptado: 02 de septiembre de 2013

Resumen

La alta generación de lodos, tanto de plantas potabilizadoras como depuradoras, es una problemática ambiental de gran interés en la actualidad. En la actualidad existe una tendencia de aprovechar estos lodos, bajo ciertas normativas que regulan su uso. Este trabajo presenta las principales propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los lodos generados en la planta potabilizadora de agua "Suquía" de la Ciudad de Córdoba, Argentina. Estos lodos, con un muy alto contenido de agua, en la actualidad se disponen con los residuos sólidos urbanos de la ciudad. El propósito de este trabajo es discutir las posibles alternativas de tratamiento de los lodos con el objeto de densificar los mismos y analizar su potencial uso como material inerte en mezclas de suelo-lodo. Las características estudiadas incluyen propiedades físicas, medición de granulometría, superficie específica, microscopía de barrido electrónico, análisis químicos y contenido de materia orgánica. En particular, se evalúa cómo la presencia de lodo afecta el comportamiento de limos recompactados con el objeto de poder construir terraplenes con este material. Los resultados obtenidos muestran que los lodos generados en la planta de tratamiento de agua pueden ser mezclados de manera segura con los suelos locales y utilizados en varias aplicaciones geotécnicas.

Palabras Clave: lodo, limo, mezcla, comportamiento.

Abstract

The significant amount of sludge, even from water treatment or waste water treatment plants, is a important environmental issue. There is a tendency to reuse this material nowadays, under different regulations that restrict their usage. This work presents relevant physical, chemical and mechanical properties of the sludge from the "Suquía" water treatment plant in Cordoba city, Argentine. The sludge has a significant amount of water and, even that, is currently being disposed with municipal solid wastes. The purpose of this research is to present different alternative uses for the sludge and to analyze

1. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

2. Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5016 Córdoba, Argentina

✉ ffrancis@efn.uncor.edu

its use as inert material in soil-sludge mixtures. Characterization consists of measurements of physical properties, particle size, specific surface, scanning electronic microscope, chemical analysis and organic matter. Mixtures of silt with different amounts of the sludge material were tested to evaluate their potential use as a construction material for slides and embankments. Obtained results show that the sediments generated in the water treatment plant can be safely mixed with local soils and used for different geotechnical applications.

Keywords: *sludge, silt, mixture, behavior.*

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se han llevado a cabo grandes esfuerzos para prevenir, o al menos minimizar, la generación de residuos a través del uso de materiales que no sean contaminantes para el ambiente.

Los procesos de tratamiento llevados a cabo en plantas potabilizadoras de agua generan lodos como subproductos que en la actualidad, en la mayoría de los casos, no tienen ningún tipo de utilización posterior y son dispuestos como un residuo. Estos lodos proceden del lavado de filtros, de los tanques de sedimentación, o una mezcla de ambos (Zhou et al., 2012). Los mismos son depositados actualmente en grandes áreas de terreno sin tratamiento alguno generando daño al medio ambiente. Este es un material compuesto por sedimentos aglomerados (flóculos) que se han formado en procesos de coagulación-floculación llevados a cabo en las piletas de tratamiento (Wang et al., 1992).

Esta problemática es de gran interés en la actualidad. Por ejemplo, en Francia, en 384 plantas potabilizadoras, con una producción total de agua tratada de $1,2 \times 10^9$ m³/año, se generan 63.800 ton/año (base seca) de lodos y en España, donde la obtención de agua potable para consumo humano proviene en más del 80% de los casos de la potabilización de aguas superficiales, se producen anualmente 120.000 ton de materia seca de este residuo en 215 estaciones de potabilización de aguas (Armenter et al., 2002; Adler, 2002; Ramírez Zamora et al., 2008). Para el caso de América Latina, en México existen 372 plantas potabilizadoras, las cuales en conjunto tratan alrededor de 109,8 m³/s de agua. De éstas, sólo operan 296 plantas con un gasto de operación de 76,8 m³/s, las cuales utilizan algún tipo de coagulante para eliminar los sólidos suspendidos que contiene el agua, siendo el sulfato de aluminio el más utilizado. Considerando un valor medio de producción de lodos de 0,7 % del agua tratada, se generan alrededor de 0,54 m³/s de lodos, que deben ser manejados y dispuestos adecuadamente. Situaciones similares se observan en Argentina y los demás países de Sudamérica.

El tratamiento de estos lodos requiere de operaciones de homogeneización, espesado, estabilización, acondicionamiento y deshidratación. Estos procesos son necesarios para la disminución de volumen, la estabilización y el secado de los lodos (Metcalf y Eddy, 1995; Barrenetxea et al., 2003; Méndez Lázaro, 2005; Maldonado Cuesta, 2005; CEDEX, 2007). Una vez realizados estos procesos es necesario disponer de manera adecuada los lodos densificados en un repositorio final o encontrar alguna aplicación de los mismos como material de construcción o en aplicaciones ambientales.

Algunos ingenieros geoambientales han concentrado sus esfuerzos en evaluar la factibilidad de utilizar diferentes materiales tales como papel, plástico, vidrio, residuos industriales y cenizas volantes, como sustitutos o agregados de suelo en

varias aplicaciones de la ingeniería civil (carretera, terraplenes y estructuras de retención). Estas aplicaciones involucran la evaluación no sólo del comportamiento mecánico, sino también de aspectos ambientales que incluyen compatibilidad química y durabilidad (Sharma y Reddy, 2004). En este contexto los lodos generados en el tratamiento de agua potable o residual constituyen un material alternativo para agregar que, por sus características, podría mezclarse con el suelo.

La tendencia mundial actual es el aprovechamiento de estos lodos bajo ciertas normativas que regulan un manejo sustentable. El objeto es evitar que el uso desmedido de lodos en suelos altere las características del sustrato y lleve a la contaminación de las aguas subterráneas, de ciertos cultivos o de la red trófica (Montserrat y Huerta, 2005).

En esta investigación se analizan propiedades físicas, químicas y mineralógicas relevantes de los lodos generados en la planta potabilizadora Suquía, la cual provee de agua a la mitad de la población de la Ciudad de Córdoba, Argentina. Este material fue ensayado en diferentes mezclas con suelo local para evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla en búsqueda de posibles aplicaciones geotécnicas y en construcciones civiles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelos y lodos utilizados

Los materiales utilizados fueron limos loésicos típicos del Centro de Argentina y lodos generados en la planta potabilizadora Suquía de la provincia de Córdoba, República de Argentina.

Los suelos loésicos utilizados son típicos de la llanura pampeana en el centro y este de la Argentina. Este tipo de suelo fue muestreado en el predio de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de Córdoba. Para ello se realizó una excavación a cielo abierto hasta la profundidad adoptada en 0,5 m (por debajo del manto orgánico). Este material ha sido ampliamente estudiado en las últimas décadas por el grupo de geotecnia de la FCEFyN de la Universidad Nacional de Córdoba. Un resumen de las principales características de este material puede encontrarse en Moll y Rocca (1991), Rocca et al. (2006), Rinaldi et al. (2007), Francisca et al. (2008) y Terzariol (2009).

El lodo utilizado se obtuvo de la Planta Potabilizadora "Suquía", de la Ciudad de Córdoba, y fue muestreado durante 17 ocasiones a lo largo de todo un año. Dicha planta utiliza sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación. El lodo producido durante la coagulación se comporta como un fluido viscoso, es voluminoso y de aspecto gelatinoso. Este material contiene óxidos e hidróxidos metálicos y compuestos orgánicos e inorgánicos (microorganismos, arcilla y limo). Los hidróxidos presentes en la masa de lodo contienen grandes

cantidades de agua atrapada en su estructura, lo que dificulta la deshidratación completa del mismo.

Procedimientos experimentales

Propiedades físicas del lodo y suelo

Las principales propiedades físicas de los lodos y el limo estudiado se determinaron siguiendo los lineamientos de las normas (ASTM, 2007). Las propiedades estudiadas incluyeron granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, superficie específica y clasificación unificada.

Propiedades fisico-químicas del lodo

Se determinó el contenido de materia orgánica a partir de la pérdida de peso por calcinación. El lodo fue inicialmente secado en estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y luego calcinado en una mufla a 600°C durante 90 minutos. El contenido de materia orgánica en el material seco se determinó a partir de la pérdida de peso debido a la calcinación.

El análisis químico incluyó la determinación de pH, aniones, análisis bacteriológico y presencia de metales. El análisis de aniones y bacteriológico fue determinado preparando una mezcla de 5gr en 500ml de agua calidad reactivo. El análisis de metales fue realizado sobre las muestras de lodo en estado natural. El pH del lodo fue determinado sobre especímenes en estado natural, secado en estufa a 105°C y calcinado a 600°C . Para ello se mezcló el lodo con agua desionizada en una relación 1:10. Esta mezcla se dejó equilibrar durante unos minutos para posteriormente determinar el pH del sobrenadante empleando un medidor de pH con electrodo de vidrio.

Composición mineralógica del lodo

Se determinó la composición mineralógica por difracción de rayos X sobre muestra total sin orientar y sobre la fracción arcilla ($<2\mu\text{m}$, separada por decantación) en preparados orientados naturales, glicolados y calcinados a 500°C , empleando para ello un difractor de polvos Philips X'Pert PRO PW3050/60 con radiación de $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,5418\text{\AA}$), monocromador de silicio, a 40kV y 40mA, a una velocidad de barrido de aprox. $2^\circ/20/\text{min}$. Para el procesamiento de los difractogramas se usó el programa HighScore Plus de Philips.

Estas determinaciones se complementaron con microscopía electrónica de barrido (SEM) LEO 1450VP equipado con un sistema de detección de rayos x dispersivo en energías (EDAX Genesis 2000) perteneciente al LABMEM de la Universidad Nacional de San Luis, que permitió caracterizar la morfología y composición química de las partículas e identificar la presencia de diatomeas y otros restos orgánicos.

Ensayos mecánicos en mezclas de limo-lodo

Los ensayos realizados consistieron en ensayos de compactación, consolidación, resistencia a la compresión simple y resistencia triaxial. Estos ensayos fueron realizados en mezclas de limo con distintos contenidos de lodo secado en estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Los ensayos de compactación fueron realizados sobre mezclas de limo con 0, 8 y 16% de lodo (referido al peso de suelo seco). La compactación de las muestras se realizó siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D698-12 (ASTM 2007), pero en un molde de 50,5 mm de diámetro interior, 100 mm de altura, un pisón de 0,72 kg peso y altura de caída de 0,297 m, variando los números de golpes y capas para lograr la energía del ensayo Proctor Normal.

Los ensayos de consolidación unidimensional fueron realizados en mezclas de limo con 0, 2, 8, 16 y 32% de lodo seco, molido y tamizado por el tamiz N°40. Las presiones verticales aplicadas a las muestras durante los ensayos fueron 12, 27, 54, 111, 216 y 438 kPa. Los ensayos fueron realizados siguiendo los procedimientos de la norma ASTM D2435 (ASTM2007).

Los ensayos de compresión simple fueron realizados sobre muestras compactadas con la energía correspondiente al ensayo Proctor Normal siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D2166-06 (ASTM2007). Se ensayaron mezclas de limo con 0, 8 y 16% de lodo seco, compactadas con distintas humedades.

Los ensayos triaxiales se realizaron siguiendo la metodología correspondiente a pruebas de carga axial bajo condición consolidada y drenada de acuerdo a la norma ASTM D7181-11 (ASTM2007). En este caso se ensayaron muestras de limo y limo con 32% de lodo, en estado compactado utilizando la energía de compactación del ensayo Proctor Normal. Los especímenes de limo fueron compactados a contenidos de humedad de $14 \pm 1\%$, mientras que los especímenes de limo con 32% de lodo fueron compactados a contenidos de humedad de 16%. El criterio de falla adoptado para estos ensayos fue el máximo valor de tensión desviadora $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$.

RESULTADOS OBTENIDOS

Propiedades físicas, químicas y mineralógicas del lodo

La Tabla 1 resume las principales propiedades físicas del limo y lodo ensayado. Las propiedades del limos se encuentran dentro de los rangos típicos esperados para los loess pampeanos (Francisca et al., 2008). En el caso del lodo, se destaca que presenta un alto contenido de partículas del tamaño de las arcillas y un elevado límite líquido. Sin embargo, la plasticidad resultó nula (comportamiento similar a las arenas). Este comportamiento se atribuye a la presencia de electrolitos y polielectrolitos incorporados en el proceso de potabilización del agua. Además, el lodo está compuesto por 86% de agua y el contenido de materia orgánica es prácticamente el 50% de la materia inorgánica, lo cual afecta significativamente la gravedad específica, humedad, plasticidad, capacidad de intercambio catiónico, conductividad hidráulica, compresibilidad y resistencia (Huang et al., 2009). En particular se observa que el pH resultó diferente cuando se ensayó la muestra en estado natural, secada a estufa y calcinada, lo cual se encontraría asociado a la reducción de la materia orgánica presente en el lodo por efecto del incremento de temperaturas (Sunil et al., 2006).

Los principales aniones encontrados fueron el fosfato (2mg%) y sulfato (23mg%) (Tabla 2), mientras que el análisis de metales arrojó resultados positivos en el caso de calcio, cobre, cromo, hierro, magnesio y aluminio, metales tales como cadmio, níquel y plomo fueron detectados en cantidades traza. Todas las concentraciones encontradas en este material están dentro del rango admisible para su aplicación en suelos.

Valores típicos de la composición mineral de los lodos indican que aproximadamente un 30% estaría compuesto por cuarzo, 25% calcita, 10% plagioclasa, 20% de filosilicatos (arcillas y micas en general), 10% de cristobalita y sílice (en forma de diatomeas), y en menor proporción se encontraría hematita (Figura 1). El difractograma presenta un pico anómalo identificado como polielectrolito, el cual está asociado a los productos químicos incorporados durante la potabilización del agua y densificación de lodos para la floculación de las partículas. Aún

Tabla 1. Propiedades físicas de los materiales utilizados.

Propiedad	Materiales		Norma/Método
	Limo	Lodo	
Gravedad Específica	2,61	2,34	ASTM D854-83
Fracción arenosa (> 0,1 mm)[%]	7	0	
Fracción limosa (0,1 mm - 0,002 mm)[%]	84	70	ASTM D422-63
Fracción arcillosa (<0,002 mm)[%]	9	30	
Límite Líquido [%]	29,6	62 a 72	ASTM D4318-84
Índice Plástico [%]	1,79	0	ASTM D4318-84
Superficie específica [m ² /gr]	8,58	5,51	<i>Santamarina et al. (2002)</i>
Clasificación Unificada	ML	OH - MH	ASTM D2487- 90

ND = No Determinado

Tabla 2. Análisis químico y de metales de diferentes muestras de lodo generado en el tratamiento de agua potable.

Propiedad	Lodo	
Contenido de materia orgánica [%]	4,22	
Contenido de materia inorgánica [%]	9,06	
Contenido de agua [%]	86,72	
pH lodo en estado húmedo	7,41	
pH lodo secado a 105 °C	7,42	
pH lodo calcinado a 600 °C	9,63	
Análisis químico		
Análisis de aniones	Cloruro [mg%]	N/D - LD: 15
	Nitrato [mg%]	Interferente
	Nitrito [mg%]	0,5
	Sulfato [mg%]	23
	Fósforo [mg%]	2
Análisis bacteriológico	Coliformes Totales [NMP/100 ml]	325
	Escherichia Coli	Presencia P/A en 1 gr
Análisis de metales	Cadmio [mg%]	< cmd 0,35
	Calcio [g%]	2,3
	Cobre [mg%]	3,2
	Cromo [mg%]	1,5
	Hierro [gr%]	1,8
	Magnesio [mg%]	400
	Manganeso [mg%]	66
	Níquel [mg%]	< cmd; cmd: 1
	Plomo [mg%]	< cmd: 5
	Aluminio [mg%]	140

ND = No disponible LD = Límite de detección Cmd = Cantidad mínima detectable Cmd = Cantidad mínima cuantificable

luego de sucesivos lavados de las muestras, una fracción del mismo permanece con las partículas floculadas y se manifiesta en el difractograma como un pico no asociado a ningún mineral específico. Además, en las imágenes de microfotografía obtenidas en el microscopio de barrido electrónico se observó un alto contenido de diatomeas y otros restos biogénicos (Figura 2).

Las partículas minerales son de grano muy fino, las arcillas se encuentran en láminas equigranulares con bordes irregulares similares a las de los suelos loessoides de Córdoba. Se observan numerosos fragmentos de diatomeas y otros restos orgánicos, láminas de arcillas y otro material granular muy fino (<1µm) rico en aluminio.

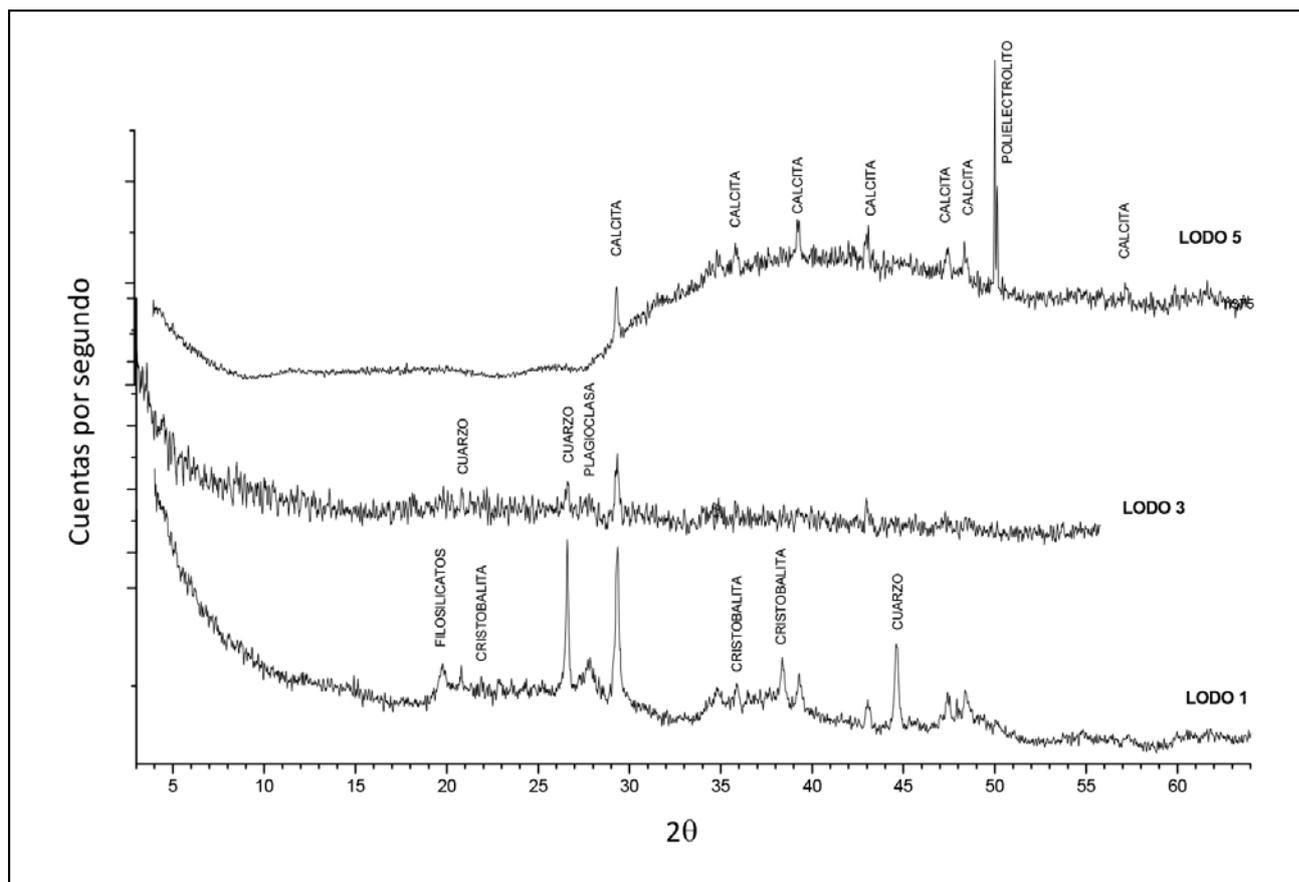


Figura 1. Difractogramas de tres muestras selectas de lodo.

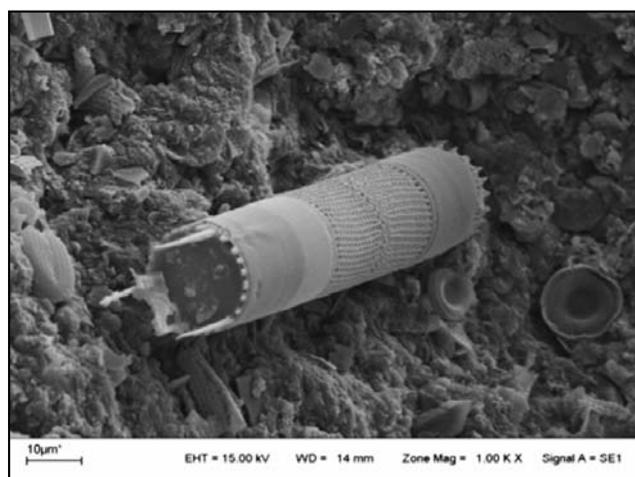


Figura 2. Microfotografía de electrones de lodo (10000X).

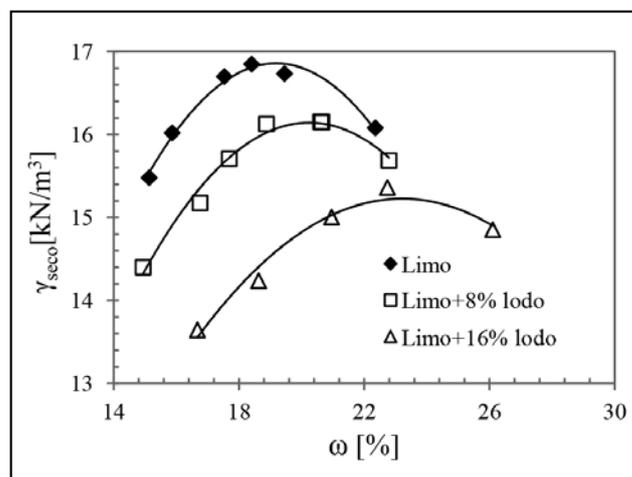


Figura 3. Curvas de compactación Proctor Normal en mezclas de limo-lodo.

Influencia del contenido de lodo en la compactación

La Figura 3 presenta las curvas de compactación obtenidas en las mezclas de limo-lodo. Las líneas sólidas se colocan como guía para la visual del lector (no son líneas de tendencia). Los resultados mostraron que la adición de lodo generó una disminución del peso unitario seco máximo e incrementó el contenido de humedad óptimo. La inclusión de lodo en el limo, antes de la compactación, produce un arreglo de partículas más floculado o abierto (con mayor relación de vacíos), generando contactos borde-cara posiblemente inducidos por el alto contenido salino de los lodos incorporados.

Comportamiento frente a procesos de consolidación

El coeficiente de consolidación (C_v) para muestras compactadas de limo con 0, 2, 8 y 16% de lodo resultaron en el rango de 2,5 y 3,5cm²/min (ver Figura 4). En cambio la adición de 32% de lodo resultó en un aumento bien definido en el coeficiente de consolidación, alcanzando valores en el rango de 3,4 a 3,7cm²/min. Los valores altos de C_v pueden atribuirse al estado compactado de las muestras, en las cuales la consolidación ocurre relativamente rápido, efecto posiblemente asociado también a la alta concentración de sales de los lodos ensayados.

La Figura 5 muestra curvas de compresibilidad obtenidas para mezclas de limo con distinto contenido de lodo. Los resultados evidenciaron que la adición de lodo generó cambios en la compresibilidad del suelo y un ligero incremento en la relación de vacíos inicial. La Tabla 3 resume valores de índice de recompresión (C_r), e índice de compresión (C_c) obtenidos. Es importante destacar que en estos ensayos se intentó lograr condiciones de densidad seca o relación de vacíos inicial similar para todas las muestras. Sin embargo, la adición del lodo, con alto contenido de materia orgánica y una estructura porosa, produce naturalmente una disminución de la densidad seca, por lo que fue necesario aumentar la energía de compactación

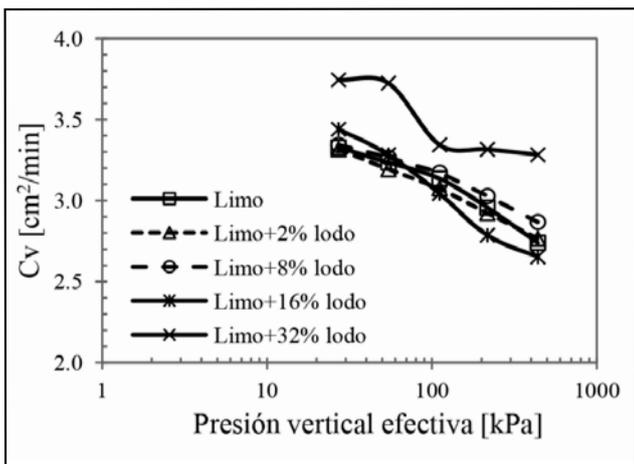


Figura 4. Variación del coeficiente de consolidación (C_v) con la presión vertical efectiva (σ'_v).

Tabla 3. Índice de recompresión (C_r) e índice de compresión (C_c) para mezclas de limo compactado con distintos contenidos de lodo

Contenido de lodo [%]	C_r	C_c
0	0,07	0,21
2	0,086	0,15
8	0,077	0,15
16	0,06	0,14
32	0,011	0,03

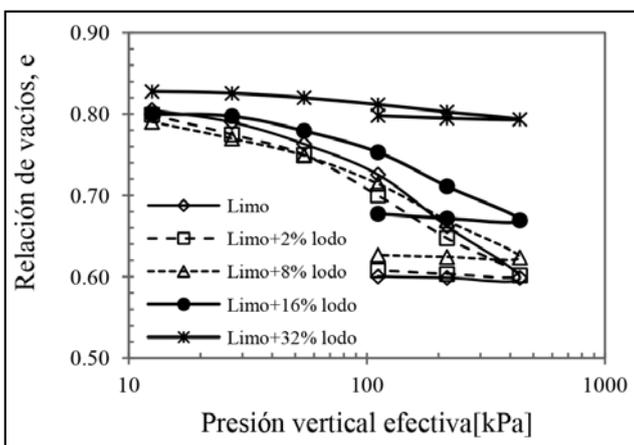


Figura 5. Curvas de compresibilidad para mezclas de limo con diferente porcentaje de lodo.

a medida que el aumentaba el contenido de lodo con el objeto de obtener relaciones de vacíos iniciales similares. Debido a ello, cuando el contenido de lodo es pequeño, la estructura y arreglo de partículas está principalmente controlado por la fracción de limo, mientras que para altos contenidos de lodo el mismo controla el comportamiento de la mezcla. Es por ello que puede observarse que la deformabilidad de las muestras aumentó con el contenido de lodo hasta un 16%, pero la muestra con un 32% resulta más rígida como consecuencia de la muy alta energía de compactación utilizada para lograr una relación de vacíos inicial comparable con las demás.

Resistencia a la compresión simple de mezclas de limo-lodo compactadas

La resistencia a la compresión simple (RCS) del limo compactado también se redujo con el contenido de lodo, tal como puede observarse en la Figura 6. La Figura 6a presenta los resultados para el caso de la muestra de limo compactado, mientras que las Figuras 6b y 6c muestran los resultados obtenidos en las muestras con 8% y 16% de lodo, respectivamente. Sin embargo, la disminución de la RCS resultó poco significativa, aunque si la forma de las curvas tensión-deformación presentaron un aspecto diferente. En general, se obtuvieron mayores resistencias cuando las muestras se compactaron en la rama seca, en comparación con las muestras compactadas en la rama húmeda. La adición de lodo genera un incremento en el módulo de elasticidad inicial ($E_{inicial}$) con lo cual también disminuyen las deformaciones en el punto de rotura de la muestra. Esto genera que la estructura interna tienda a un comportamiento frágil. Adicionalmente, las muestras con mayor contenido de humedad, presentaron menores deformaciones a medida que aumenta el contenido de lodo. Esto se debe a la presencia de partículas y fracciones angulosas asociadas a la presencia de diatomeas como la mostrada en la Figura 2.

Comportamiento tensión-deformación, cambio volumétrico y módulo de elasticidad estático en condiciones drenadas

La Figura 7 presenta el comportamiento de tensión desviadora y deformación volumétrica con la deformación axial generada en condiciones triaxiales para probetas de limo compactado. La Figura 7a muestra el comportamiento tensión-deformación axial observado mientras que la Figura 7b presenta las correspondientes curvas de deformación volumétrica en función de la deformación axial registrada durante el ensayo de las probetas. Estos mismos resultados son presentados, también en la Figura 8 para especímenes de limo mezclado con 32% de lodo. De manera similar que en el caso anterior, la Figura 8a muestra el comportamiento tensión-deformación y la Figura 7b la relación existente entre la deformación volumétrica y la deformación axial registrada en los ensayos.

Es importante destacar que en este caso las muestras fueron preparadas compactadas usando la misma energía de compactación, la cual se estipuló igual a la del ensayo Proctor estándar. Por lo tanto, la muestra de limo resultó con menor relación de vacíos que la mezcla limo-lodo, siendo los pesos unitarios de las muestras ensayadas $\gamma_d = 15,8 \text{ kN/m}^3$ y $12,5 \text{ kN/m}^3$, respectivamente,

El comportamiento tensión-deformación mostrado en la Figura 7a es típico para los limos compactados ensayados en condición drenada. La tensión desviadora máxima aumenta con la presión de confinamiento, como también lo hace la pendiente

inicial o módulo de deformación del suelo. Un resultado similar se obtuvo para el caso del suelo compactado con un 32% de limo.

Un comportamiento similar se obtuvo en la muestra de limo-lodo, donde las curvas tensión-deformación desarrollan un pico y al alcanzar la tensión máxima, la resistencia axial disminuye con el incremento de la deformación vertical (ϵ_v) (Figura 8a).

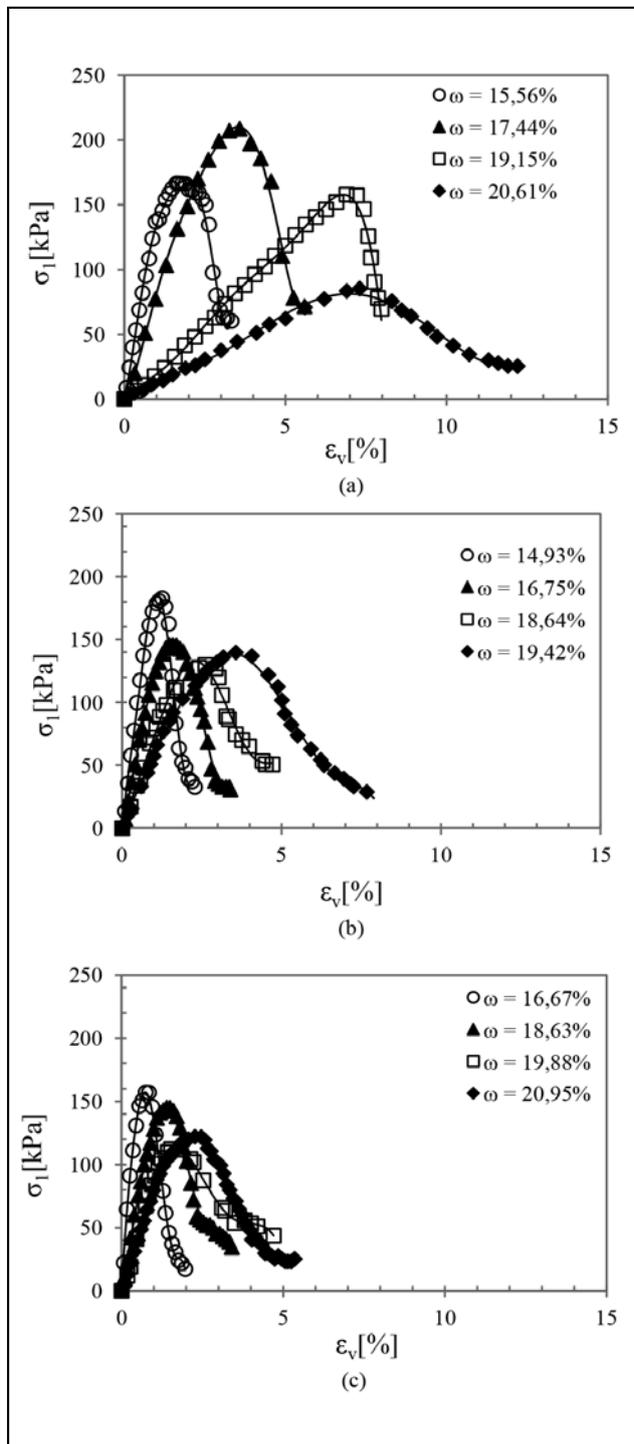


Figura 6. Influencia de la humedad de compactación en la resistencia a la compresión simple (RCS) de muestras compactadas con la energía del ensayo Proctor estándar. a) limo, b) limo con 8% de lodo, y c) limo con 16% de lodo.

Por otro lado, durante la aplicación de la carga, ambos especímenes muestran una disminución de volumen con el incremento de la deformación vertical (ϵ_v) (ver Figura 7b y 8b). Esta deformación volumétrica (ϵ_{vol}) duplica su valor cuando se adiciona 32% de lodo. La menor densidad del lodo y su influencia en la relación de vacíos inicial de cada una de las muestras explica este comportamiento. Como se mencionó antes, el menor peso unitario seco de las muestras de limo-lodo compactado resultan en una mayor deformabilidad de este material, en coincidencia con los resultados discutidos anteriormente.

A bajos confinamientos ($\sigma'_3=50\text{kPa}$), los especímenes de limo y limo con 32% de lodo presentan un módulo de elasticidad máximo ($E_{m\acute{a}x}$) similar. Este valor se mantiene constante para elevados confinamientos en la muestra de limo con 32% de lodo, no siendo el caso para el espécimen de limo que refleja un incremento en su valor.

A partir de las curvas de tensión-deformación se graficaron las trayectorias de esfuerzo seguidas durante los ensayos en un diagrama q' - p' , siendo " p' " el centro de los círculos de Mohr y " q' " el radio del mismo (Holtz y Kovacs 1981) (Figura 9):

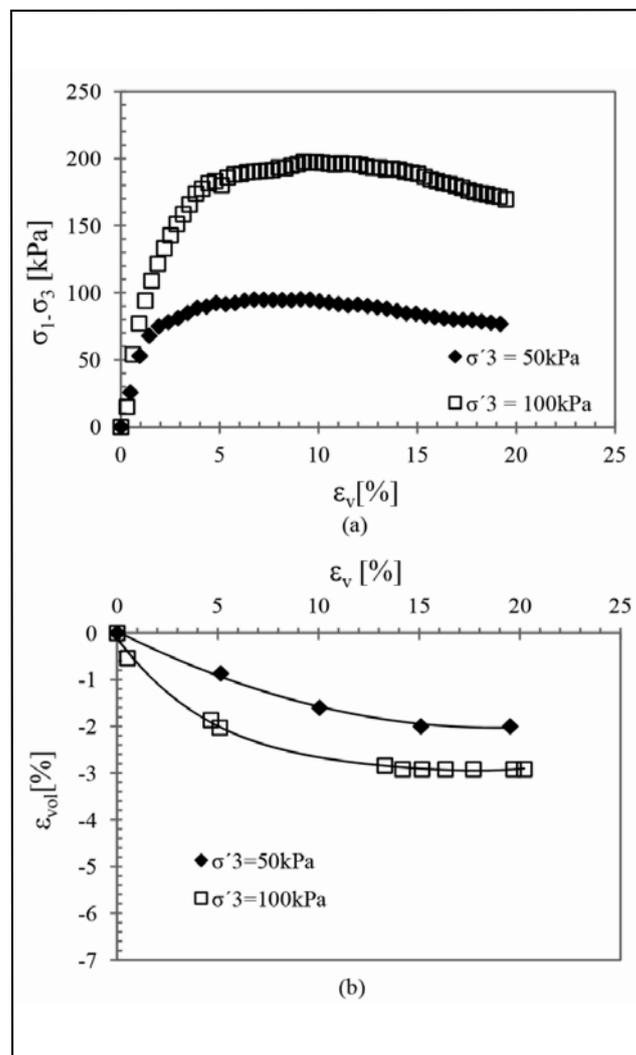


Figura 7. Ensayo triaxial consolidado drenado sobre espécimen de limo compactado: a) comportamiento tensión-deformación, b) cambio volumétrico.

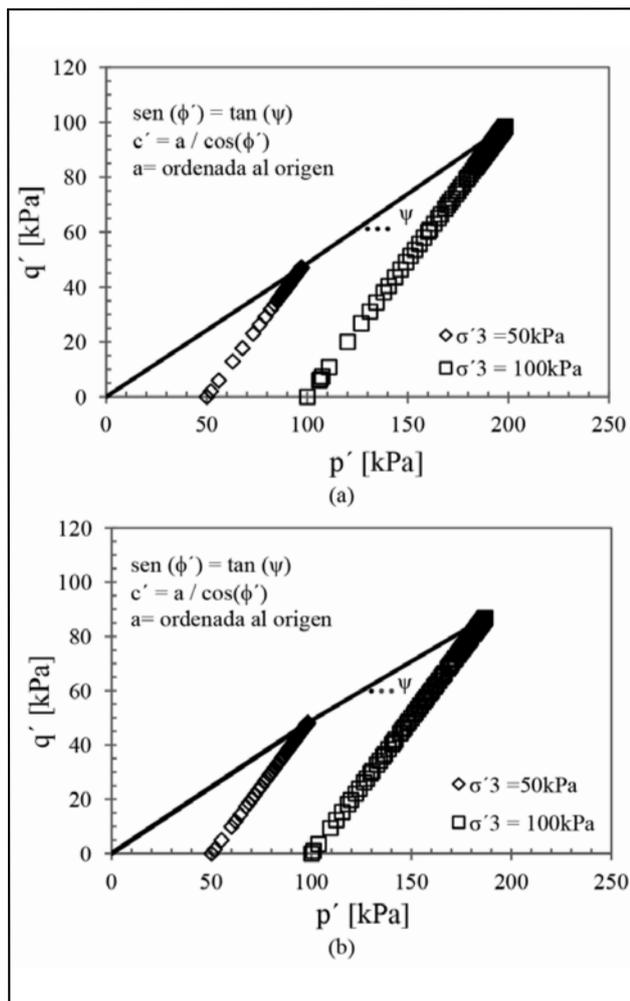
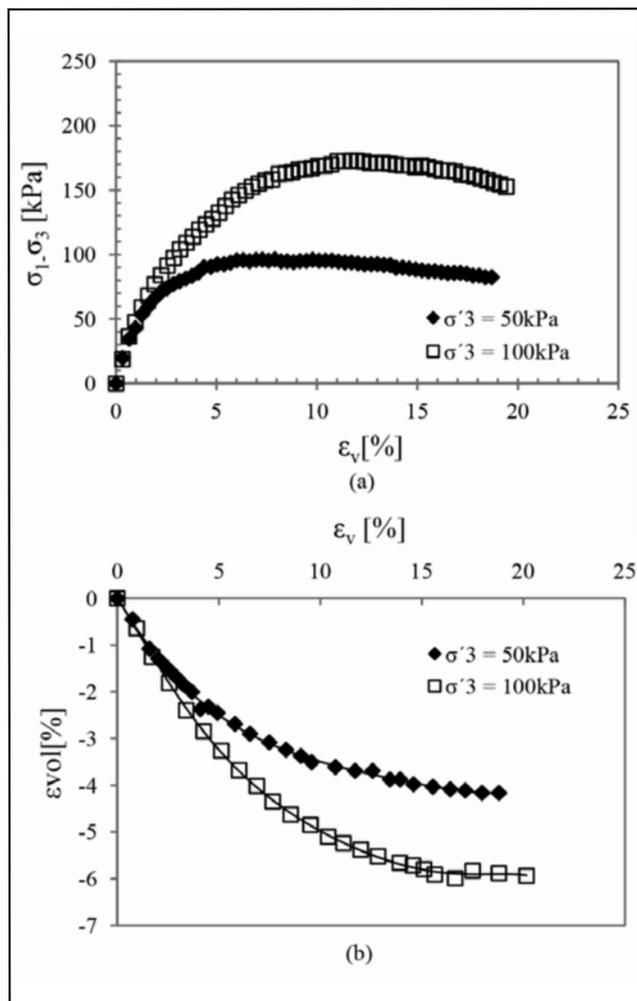


Figura 8. Ensayo triaxial consolidado drenado sobre espécimen de limo compactado con 32% de lodo: a) comportamiento tensión-deformación, b) cambio volumétrico.

Figura 9. Trayectoria de esfuerzos y parámetros resistentes obtenidos en los ensayos triaxiales: a) limo compactado b) limo con 32% de lodo compactado.

$$p' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2 \quad (1)$$

$$q' = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2 \quad (2)$$

de lodo resultó $\phi' = 26,47^\circ$, lo cual resulta en una disminución prácticamente insignificante para la práctica de la ingeniería geotécnica.

DISCUSIÓN

Donde σ'_1 es la tensión efectiva principal mayor y σ'_3 la tensión efectiva principal menor (presión de confinamiento o de cámara en el ensayo triaxial). Las líneas sólidas mostradas en la Figura 9 constituyen las líneas de falla en el espacio $q'-p'$ por lo que a partir de las mismas se obtiene el ángulo de fricción y cohesión efectivas de cada muestra ensayada. Al pasar las rectas por el origen, la cohesión efectiva resulta nula en ambos casos y el ángulo de fricción (ϕ') se calcula de la siguiente manera (Holtz y Kovacs 1981):

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, es posible realizar una comparación de diferentes propiedades, tanto físicas como mecánicas, de los materiales ensayados que permiten evaluar el potencial uso de mezclas de limo-lodo en la construcción de terraplenes compactados. La Tabla 4 resume propiedades físicas y mecánicas del limo en estado natural y compactado, así como también las del limo con adición de diferentes porcentajes de lodo.

$$\text{sen}(\phi') = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{(\sigma'_1 + \sigma'_3)} = \frac{q'}{p'} \quad (1)$$

Si bien existe variabilidad de las propiedades físicas y mecánicas de los limos con la adición de lodo, se observa que para los porcentajes estudiados no producen cambios significativos en las propiedades físicas y mecánicas, tales como peso unitario seco máximo, resistencia a compresión simple, ángulo de fricción y módulo de rigidez estático confinado saturado a 50kPa y 100kPa. Por lo tanto, la utilización de los lodos en mezclas de suelo-lodo compactado permitiría tener ventajas económicas en cuanto a la reutilización de este material, el cual es considerado un residuo en la actualidad, y en cuanto al aprovechamiento del mismo como material de construcción.

En la Figura 9a se muestran los resultados obtenidos en el limo compactado mientras que en la Figura 9b se presenta la trayectoria de esfuerzo para las muestras de limo compactado con 32% de lodo. El ángulo de fricción en condiciones drenadas de la muestra de limo en el intervalo de presiones ensayado resultó $\phi' = 27,14^\circ$, mientras que para la muestras con 32%

Tabla 4. Comparación entre propiedades físicas y mecánicas de limos en estado natural, lodos en estado natural y limos con diferente porcentaje de lodo en condición compactada.

Propiedades físicas y mecánica	Unidad	Limo*	Limo+ % lodo				Lodo
			0%	8%	16%	32%	
			<i>Natural</i>	<i>Compactado</i>		<i>Natural</i>	
Fracción arenosa (>0,1 mm)	%	5-15	7	N/A	N/A	N/A	0
Fracción limosa (0,1 mm-0,002 mm)	%	40-75	84	N/A	N/A	N/A	70
Fracción arcillosa (< 0,002 mm)	%	7-25	9	N/A	N/A	N/A	30
Límite líquido (LL)	%	20,8-32,2	29,6	71,77	65,37	N/A	62-72
Límite plástico (LP)	%	0,0-8,0	1,79	70,77	62,26	N/A	0
Peso unitario seco máximo (Proctor Normal)	kN/m ³	16,0-17,8	16,9	16,2	15,2	N/A	0,66-0,82**
Resistencia a compresión simple (RCS)	kN/m ²	45,0-130,0	124-193	109-168	94-144	N/A	N/A
Módulo de rigidez estático confinado saturado (50kPa)	kN/m ²	N/A	5600	N/A	N/A	5500	N/A
Módulo de rigidez estático confinado saturado (100kPa)	kN/m ²	1000-4000	8900	N/A	N/A	6000	N/A
Ángulo de fricción efectiva, Ø'	°	26-30	27,14	N/A	N/A	26,47	40-45**
Cohesión efectiva, c'	kN/m ²	0-8	0	N/A	N/A	0	6-9**

Nota: N/A= no disponible, *Francisca et al. (2002); **Recopilado de Lim et al. (2002), Lo et al. (2002), Stone (1998) y Wang et al. (1992)

SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

Se estudiaron las principales propiedades físicas, químicas y mineralógicas de lodos generados en la planta potabilizadora de agua "Suquía", en Córdoba, Argentina. A partir de las mismas se diseñaron mezclas de limo loésico con distintos contenidos de lodo. Estas mezclas fueron ensayadas para evaluar el potencial uso de las mismas como material de construcción de terraplenes y rellenos no estructurales de suelo compactado.

El análisis químico de los lodos demostró que la utilización de los mismos resultaría compatible con el ambiente ya que no presenta elementos químicos que puedan ser considerados perjudiciales. Estos lodos se encuentran compuestos por un 30% de cuarzo, 25% de calcita, 10% de plagioclasas, 20% de filosilicatos (arcillas y micas en general), 10% de cristobalita y sílice (en forma de diatomeas) y escasas hematita. La presencia de diatomeas, debido a la rugosidad de las mismas contribuye a que la trabazón entre partículas a nivel microscópico se vea favorecida lo que se manifiesta en un aumento de los módulos de deformación cuando las muestras son compactadas con similar relación de vacíos. Al mismo tiempo, si se utiliza una misma

energía de compactación, las muestras con lodo resultan menos densas por lo que resultan más compresibles. Sin embargo, el comportamiento en resistencia medido a través del ángulo de fricción no se ve alterado por la presencia del lodo.

Los cambios observados en las propiedades físicas y resistentes de los limos compactados con lodo resultaron muy poco significativos. Por lo tanto, el uso de este material permitiría aprovechar un residuo como material de construcción. Las principales aplicaciones en las cuales podría utilizarse este material serían en la construcción de terraplenes o rellenos no estructurales de suelo compactado o para el relleno de excavaciones para la remediación de sitios afectados por la extracción de áridos o por actividades mineras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Aguas Cordobesas S.A. por la confianza y apoyo prestado durante las investigaciones realizadas, a la SECYT-UNC y CONICET por el financiamiento parcial de las investigaciones y al ISEA, FCQ, FAMAFA y FCEfyN de la UNC por las facilidades provistas.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ADLER, E., 2002.

Gestión de boues d'eau potable à la recherche des bonnes pratiques. *Synthèse du groupe "terres de decantation" (AGHTM), France.*

ARMENTER, F.J.L.; CRISTIA, R.J.; CUSIDÓ, F.J.A.; ARTEGA, N.F.; CREMADES, O.L., 2002.

Innovación en el tratamiento de fangos de una ETAP. Secado por atomización y aprovechamiento en la industria cerámica, *Tecnología del agua 232: 26-33*

ASTM, 2007.

Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA.

- BARRENETXEA O.; SEARRANO C.P.; DELGADO A.G.; RODRÍGUEZ M.N.; RODRÍGUEZ F.V.; BLANCO J.A., 2003.
Contaminación Ambiental: una morada desde la química.
Ed. Thomson, Madrid.
- CEDEX, 2007.
Lodos de depuradoras,
Centro de Estudios y Experimentación de obras públicas – Gobierno de España Madrid.
- FRANCISCA F.M.; REDOLFI E.R.; PRATO C.A., 2002,
Análisis de Tuberías enterradas en suelos loésicos: efecto de la saturación del suelo.
Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil. 2(2): 3-19.
- FRANCISCA F.M., ROCCA R.J., DAHBAR P., VERRA M., 2008.
Variabilidad de las propiedades geotécnicas de los limos loésicos de Córdoba.
XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 15 al 17 de Octubre, pp. 1-9, La Plata, Argentina.
- HOLTZ R.D.; KOVACS W.D., 1981.
An introduction to Geotechnical Engineering.
Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- HUANG P.T.; PATEL M.; SANTAGATA M.C.; BOBET A. 2009.
Classification of organic soils. Publication FHWA/IN/JTRP-2008/02.
Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette.
- LIM S., JEON W., LEE J., LEE K., KIM., 2002,
Engineering properties of water/wastewater-treatment sludge modified by hydrated lime, fly ash and loess.
Water Research 36: 4177-4184.
- LO I.M.C.; ZHOU W.W.; LEE K.M., 2002.
Geotechnical characterization of dewatered sewage sludge for landfill disposal.
Canadian Geotechnical Journal 39: 1139-1149.
- MALDONADO CUESTA M., 2005.
Heliantis, una solución energéticamente aceptable para el secado de fangos,
Revista DYNA 80: 31-34.
- MENDEZ LÁZARO A, 2005.
Obtención de biocombustibles por tratamiento térmico de lodos de depuradora.
IV Jornadas Abulenses de Energías Renovables, 8-10 abril 2005. España.
- METCALF Y EDDY, 1995.
Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización
3ra. Edición. Ed. Mc Graw-Hill, España.
- MOLL, L.L., ROCCA, R.J., 1991,
Properties of loess in the center of Argentina,
XI Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Viña del Mar, Chile, Vol. I, pp. 1-14.
- MONSERRAT S.; HUERTA O., 2005.
Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas.
Escola Superior d'Agricultura de Barcelona. UPC.
- RAMIREZ ZAMORA R.M.; AYALA FE., GARCÍA LC.; MORENO A.D.; SCHOWENAARS R., 2008.
Optimization of the Preparation Conditions of Ceramic Products using Drinking Water Treatment Sludges.
Journal of environmental science and health part a-toxic/hazardous substances & environmental engineering. Vol. 43(13):1562-1568.
- RINALDI V.A., ROCCA R.J., ZEBALLOS M.E., 2007.
Geotechnical characterization and behaviour of argentinean collapsible loess",
en Tan, Phoon, Hight and Lerouiel (Eds) Characterization and Engineering Properties of Natural Soils. Vol 4, pp 2259-2286. Taylor and Francis Group, London.
- ROCCA, R.J., REDOLFI, E. R., TERZARIOL, R. E., 2006.
Características geotécnicas de los loess de Argentina, *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2) 149-166.*
- SANTAMARINA J.C., KLEIN K.A.; WANG Y.H.; PRENCKE E. 2002.
Specific surface: determination and relevance.
Canadian Geotechnical Journal 39: 233-241.
- SHARMA H.D., REDDY K.R., 2004.
Geoenvironmental Engineering.
John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- STONE R.J.; EKWUE E.I.; CLARKE R.O., 1998.
Engineering properties of sewage sludge in Trinidad.
J. of Agric. Engng. Res. Vol. 70, pp. 221-230.

- SUNIL B.M.; NAYAK S.; SHRIHARI S., 2006.
Effect of pH on the geotechnical properties of laterite.
Engineering geology. Vol. 85. Pp. 197-203.
- TERZARIOL R.E. 2009.
40 años de estudio de los suelos loessicos en Córdoba, Argentina.
Desafíos y avances de la geotecnia joven en Sudamérica (Francisca, F.M. Ed.), Alejandria, Córdoba, Argentina.
- WANG M.C.; HULL J.Q.; JAO M.; DEMPSEY B.A.; CORNWELL D.A. 1992.
Engineering behavior of water treatment sludge.
Journal of Environmental Engineering. Vol. 118(6): 848-864.
- ZHOU Z.; YANG Y.; LI X.; GAO W.; LIANG H.; LI G., 2012.
Coagulation efficiency and flocs characteristics of recycling sludge during treatment of low temperature and micro-polluted water.
Journal of Environmental Sciences. Vol. 24 (6): 1014-1020.