



Aptitud de dos sedimentitas rojas cretácicas del departamento Confluencia, Neuquén, para ser usadas como barreras aislantes en rellenos sanitarios

Suitability of two red cretaceous sedimentary rocks from Confluencia department, Neuquén, to be used as isolation barriers in landfills

Musso, T.B. ¹⁻² ✉ - Pettinari, G. ¹ - Francisca, F.M. ²⁻³

Recibido: 29 de Marzo de 2012 • Aceptado: 05 de Diciembre de 2012

Resumen

En este trabajo, se presenta la caracterización de dos sedimentitas de grano fino del departamento Confluencia, Neuquén, que forman parte de las formaciones Huincul y Anacleto (Grupo Neuquén - Cretácico Superior) con el objetivo de determinar su aptitud para ser usadas como materiales para impermeabilizar la base de rellenos sanitarios. Las muestras fueron extraídas de dos canteras inactivas de arcillas rojas, explotadas como materia prima para la industria de la cerámica, y representan el material que se comercializaba para este fin. Los resultados fueron comparados con una bentonita sódica natural comercial la cual se utilizó como material de referencia. En función de la distribución del tamaño de partículas, las sedimentitas se clasifican como una fangolita (F. Huincul) y una arcilita (F. Anacleto). La mineralogía de la fracción arcilla de estas sedimentitas está representada principalmente por un interestratificado I/S tipo RO (55-80% Sm). Las sedimentitas rojas ensayadas cumplieron con los requisitos de conductividad hidráulica estipulados por la legislación internacional para su uso como barrera impermeable ($< 1 \times 10^{-9}$ m/s). Su capacidad de intercambio catiónico, como también la plasticidad y compresibilidad de las mismas, demostraron un comportamiento satisfactorio para su uso en rellenos sanitarios. En mezclas con una arena mal seleccionada, el agregado de un 15% de la arcilita de la Formación Anacleto permitió superar el requisito legal de conductividad hidráulica, mientras que la fangolita de la Formación Huincul no cumplió con dicha condición. No obstante, a diferencia de una bentonita sódica natural, estas sedimentitas podrían ser utilizadas sin ser mezcladas con otros materiales naturales (suelos o arena) por su baja compresibilidad y menor potencial expansivo. El uso de los materiales ensayados en el diseño de sistemas de impermeabilización de rellenos sanitarios constituiría una alternativa efectiva no sólo porque cumplen con los requisitos técnicos estipulados para este fin, sino también por su abundancia y bajo costo de extracción en el área de estudio.

Palabras clave: barreras arcillosas impermeables, rellenos sanitarios, conductividad hidráulica

1. CIMAR. Departamento de Geología y Petróleo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires, 1400, 8300 Neuquén, Argentina.

2. CONICET. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

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

✉ telma.musso@fain.uncoma.edu.ar

Abstract

In this study, two fine-grained sedimentary rocks from Huincul and Anacleto formations (Neuquén Group - upper Cretaceous) from Confluencia department, Neuquén, were tested to evaluate the potential of these materials for the construction of compacted clay liners in landfills. The samples were extracted from two inactive quarries of red clays, previously used as raw material for ceramic industry, and represent this commercial material. The results were compared with a commercial and natural sodium bentonite from this region, which was used as a reference material. According to the grain size analyses these rocks are classified as a mudstone (F. Huincul) and a claystone (F. Anacleto). The mineralogy of the clay fraction is dominated by a random (R0) IIS mixed-layer mineral (55-80% Sm). Obtained results of hydraulic conductivity, cation exchange capacities, plasticity and compressibility indexes show that powdered claystone and mudstone from Huincul and Anacleto formations meet international specifications for the construction of landfill liners. Mixtures with a well graded sand containing 15% of the powdered claystone from Anacleto Formation showed a hydraulic conductivity one order of magnitude below the legal specifications. On the other hand, the same mixture with Huincul mudstone did not meet the hydraulic conductivity requirement. However, in contrast to a natural sodium bentonite, these rocks could be used without mixing with other components (soils or sand) because of their low compressibility and swelling behaviour. Results show that the tested materials can be effectively utilized as a component of a barrier design in sanitary landfills not only because of the hydraulic behavior and chemical and mineralogical properties, but also due to their abundance and low cost of mining within the studied area.

Keywords: compacted clay liners, landfills, hydraulic conductivity.

INTRODUCCIÓN

Para el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU), las tendencias mundiales sugieren realizar una gestión integral donde se establezca una jerarquía u orden de preferencia en el tratamiento, que consiste en: a) minimización de residuos, b) reciclaje y reutilización, c) transformación y d) vertido en rellenos sanitarios (Tchobanoglous et al., 1993). A pesar de ello, una de las técnicas más ampliamente utilizadas y aceptadas en los países en desarrollo, es la del vertido de residuos sin ningún tratamiento previo.

La disposición de los residuos en rellenos sanitarios es el principal método de disposición en Argentina. El mismo requiere de un diseño ingenieril de las barreras de aislamiento y cobertura, así como también control del lixiviado y de los gases que allí se generan. El principal objetivo de los sistemas de sellado de los rellenos sanitarios modernos es aislar el contenido del mismo del entorno que lo rodea protegiendo al suelo y al agua subterránea de la contaminación. La principal fuente de contaminación en un repositorio la constituyen los lixiviados que se generan en el mismo los cuales deben su formación al ingreso de agua de diferentes orígenes (precipitación directa, agua subterránea, escorrentía superficial y líquidos generados por la descomposición de la basura) (Bonaparte, 1995; Bouazza y Van Impe, 1998). El diseño de los repositorios varía entre diferentes países y dentro de un mismo país, dependiendo de las prácticas y estrategias de manejo de residuos de cada lugar. La mayoría de los sitios de disposición modernos están contruidos siguiendo el principio que establece la existencia de una barrera constituida por un sistema compuesto (geotextil y/o geomembrana + barrera arcillosa) (Manassero et al., 2000; Czurda, 2006).

En la tecnología de barreras de residuos son usadas diversas variedades de arcillas comerciales como bentonitas sódicas y cálcicas, sepiolitas, paligorskitas y caolinitas (Keith, 2000). Con el objetivo de disminuir los costos de estos materiales los suelos naturales pueden ser mezclados con diversas arcillas con el objeto de reducir su conductividad hidráulica (Daniel, 1993; Benson et al., 1994; Francisca et al., 2009).

La conductividad hidráulica es el principal requerimiento en la evaluación de los materiales que se utilicen como barreras impermeables. Según lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, 1993) y las Directivas del Consejo Europeo (Comisión Europea, 1999) referentes a la disposición de residuos sólidos urbanos (RSU) y peligrosos, la conductividad hidráulica de los mismos debe ser del orden de 1×10^{-9} m/s o menor. Otro criterio de aplicación general es que el material debe poseer una alta capacidad de intercambio catiónico (Taha y Kabir, 2003), alta plasticidad y bajo contenido de material granular grueso.

En el país, como mínimo el 44% del total de los RSU que se generan son vertidos en forma inadecuada, ya sea en basurales a cielo abierto o en sitios que no cuentan con los controles mínimos requeridos para una adecuada preservación de la salud humana y del ambiente (OPS, 2002). En la región oeste de la Norpatagonia Argentina, sólo la ciudad de Neuquén posee un relleno sanitario que tiene en cuenta principios mínimos de ingeniería sanitaria para la adecuada disposición final de residuos. El resto de los municipios, de mediana y pequeña envergadura, vierten sus residuos en basurales a cielo abierto, muchos de los cuales están localizados en zonas de alta fragilidad ambiental.

En las inmediaciones de la ciudad de Neuquén, existen numerosos afloramientos de sedimentitas fluvio-continuales del Grupo Neuquén que han sido objeto de estudios geológicos sobre la estratigrafía regional, desde fines del siglo XIX, por varios autores (Doering, 1882; Keidel, 1907; Wichmann, 1927; Frenguelli, 1930; Roll, 1938; Cazau y Uliana, 1973; Ramos, 1981; Uliana y Dellapé, 1981; Legarreta y Gulisano, 1989; Espejo y Nieto, 1999; Hugo y Leanza, 2001a,b). Dada la importancia de su distribución areal y su reserva potencial, estos materiales también fueron caracterizados con el fin de conocer su aptitud de uso sobre todo para ser utilizados en la industria de la cerámica roja para la fabricación de ladrillos estructurales y tejas y como componentes minoritarios en pastas para la producción de pisos y revestimientos (Di Paola y Marchese, 1970; Giusiano y Ludueña, 1989; Danderfer y Vera, 1992; Danieli y Giusiano, 1992; Pettinari, 1995; Pettinari y Giusiano, 2011).

Tales antecedentes han permitido identificar niveles arcillosos de interés que potencialmente podrían ser utilizados como barreras impermeables para aislar el fondo y los laterales de las celdas donde se depositan los residuos en los rellenos sanitarios.

El objetivo de este trabajo es caracterizar dos sedimentitas rojas del Depto. Confluencia, antiguamente explotadas para ser usadas en la industria de la cerámica, desde un punto de vista mineralógico, fisicoquímico, químico, geotécnico e hidráulico para evaluar su aptitud para la construcción de barreras aislantes en rellenos sanitarios.

MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra comprendida en la porción suroriental de la Cuenca Neuquina, Patagonia Septentrional Argentina (Figura 1). El relleno de la Cuenca Neuquina es subdividido en tres superciclos sedimentarios: Jurásico (Triásico Tardío-Jurásico Tardío), Ándico (Jurásico Tardío-Cretácico Temprano) y Riográndico (Cretácico Tardío-Paleoceno Temprano) (Groeber, 1953). En particular, el tercer superciclo incluye el Grupo Neuquén y el Grupo Malargüe. Los niveles portadores de pelitas rojas objeto de la presente investigación pertenecen estratigráficamente al Grupo Neuquén: Subgrupo Río Limay (Formación Huincul) y Subgrupo Río Colorado (Formación Anacleto). En el área de estudio, la Formación Huincul está constituida por areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, con moderada selección. Hacia la parte media-superior se intercalan limos y arcilitas de color rojo y verde claro, alcanzando toda la secuencia una potencia de 200 m (Cazau y Uliana, 1973, Danderfer y Vera, 1992). El ambiente de deposición para esta formación ha sido descrito como fluvial. Por su parte, la Formación Anacleto, en la zona de las bardas de la ciudad de Neuquén, está conformada por estratos de areniscas grises y pelitas rojas, correspondientes a facies aluvio-fluviales, con una potencia de hasta 150 m (Heredia y Calvo, 2002).

Estudios específicos sobre la litología y mineralogía de los sedimentos pelíticos de estas formaciones en el área de estudio, han demostrado que existe una escasa variabilidad de la misma en dichos niveles (Pettinari, 1995, Pettinari et al., 1999, Pettinari y Giusiano, 2011).

Los afloramientos seleccionados corresponden a canteras inactivas de extracción de arcillas rojas que eran utilizadas en la industria de la cerámica (Figura 1, 2 y 3). En el caso de la F. Huincul se trata de "Mina Elizabeth III", conformada por tres pertenencias de 200 x 300 m (Dirección Provincial de Minería, 1978). En el caso de la F. Anacleto se trata de una explotación no declarada, que en este trabajo se denominará "Kartódromo Centenario", que abarca una superficie aproximada de 100 x 100 m. En cada sitio se tomaron muestras en canaleta del estrato pelítico que se explotaba, en distintos puntos del antiguo frente de explotación. Estas muestras fueron combinadas para obtener una única muestra representativa por formación del material que se comercializaba en cada cantera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Los materiales ensayados consisten en una fangolita roja maciza de la Formación Huincul (denominada ME) y una arcilita pardo rojiza de la Formación Anacleto (denominada KCE), aflorantes en el sector Este de la Cuenca Neuquina, Argentina (Figura 1, 2 y 3). En forma paralela, se utilizó como referencia

una bentonita sódica natural local, de denominación comercial CATAE, perteneciente a la Formación Allen (Musso et al., 2010).

En este trabajo, los materiales seleccionados se evalúan en forma pura y en mezclas con arena. Dichas mezclas se realizaron utilizando un 15% de la fangolita y arcilita en la mezcla. La arena seleccionada para este estudio se clasifica como bien graduada (SW) de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura de la arena es de $C_u = 8$ y $C_c = 1,4$, respectivamente.

Metodología

Muestreo de los niveles de sedimentitas rojas

El nivel de fangolitas rojizas macizas de la F. Huincul posee un espesor promedio de 2,5 m, geometría tabular y continuidad lateral, por lo que se realizó un muestreo en canaleta o roza en cada uno de los tres frentes de explotación. Las canaletas se realizaron desde el techo a la base del estrato recolectándose 8 Kg en cada una de ellas.

En el caso de la arcilita pardo rojiza de la F. Anacleto, el estrato de interés posee 5 m de espesor, geometría tabular y se muestreó sólo el frente de explotación que posee continuidad lateral, en 3 puntos distantes 8 m entre sí, en los que se llevó a cabo el mismo procedimiento de muestreo en canaleta antes descrito, sólo que en este caso se recolectaron aproximadamente 12 Kg por cada una.

Las muestras fueron secadas al aire, trituradas utilizando una chancadora de mandíbulas (tamaño final 1 pulgada) y luego, las submuestras provenientes de las diferentes canaletas, fueron mezcladas para obtener una única muestra por formación. Posteriormente, se procedió al cuarteo obteniéndose 10 kg de cada sedimentita. Para los ensayos tecnológicos, este material fue pulverizado a través de un molino a martillos (tamaño final 80 micrones).

Para obtener un material equivalente sería conveniente seguir primero el criterio de reconocimiento litológico de los niveles de sedimentitas y una vez obtenidas las muestras, de acuerdo a lo descrito anteriormente, se recomienda realizar en principio análisis mineralógicos y granulométricos que permitan caracterizar al material.

Mineralogía y Análisis químico

El diagnóstico de la composición mineralógica se realizó por difracción de rayos X (DRX) sobre muestra total y fracción arcilla siguiendo metodología de rutina (Moore y Reynolds, 1997). Se analizó el polvo total orientado al azar utilizando porta muestras de carga vertical. El barrido se efectuó entre los $2^\circ 2\theta$ hasta los $65^\circ 2\theta$ a una velocidad angular de $2^\circ/\text{minuto}$ y un paso de 0,02. El análisis semicuantitativo de la muestra total y fracción $< 2 \mu\text{m}$ se realizó según los factores de ponderación de Schultz (1964) y Biscaye (1965), respectivamente. El equipo utilizado fue un Rigaku D-Max IIC, con radiación Cu ($K\alpha = 1,5405 \text{ \AA}$).

Los análisis químicos sobre muestra total fueron realizados con un equipo de Fluorescencia de Rayos X por dispersión de longitud de onda (S4 Pioneer de Broker). La cuantificación se realizó por el método de parámetros fundamentales utilizando el software vinculado al equipo (SpectraPlus).

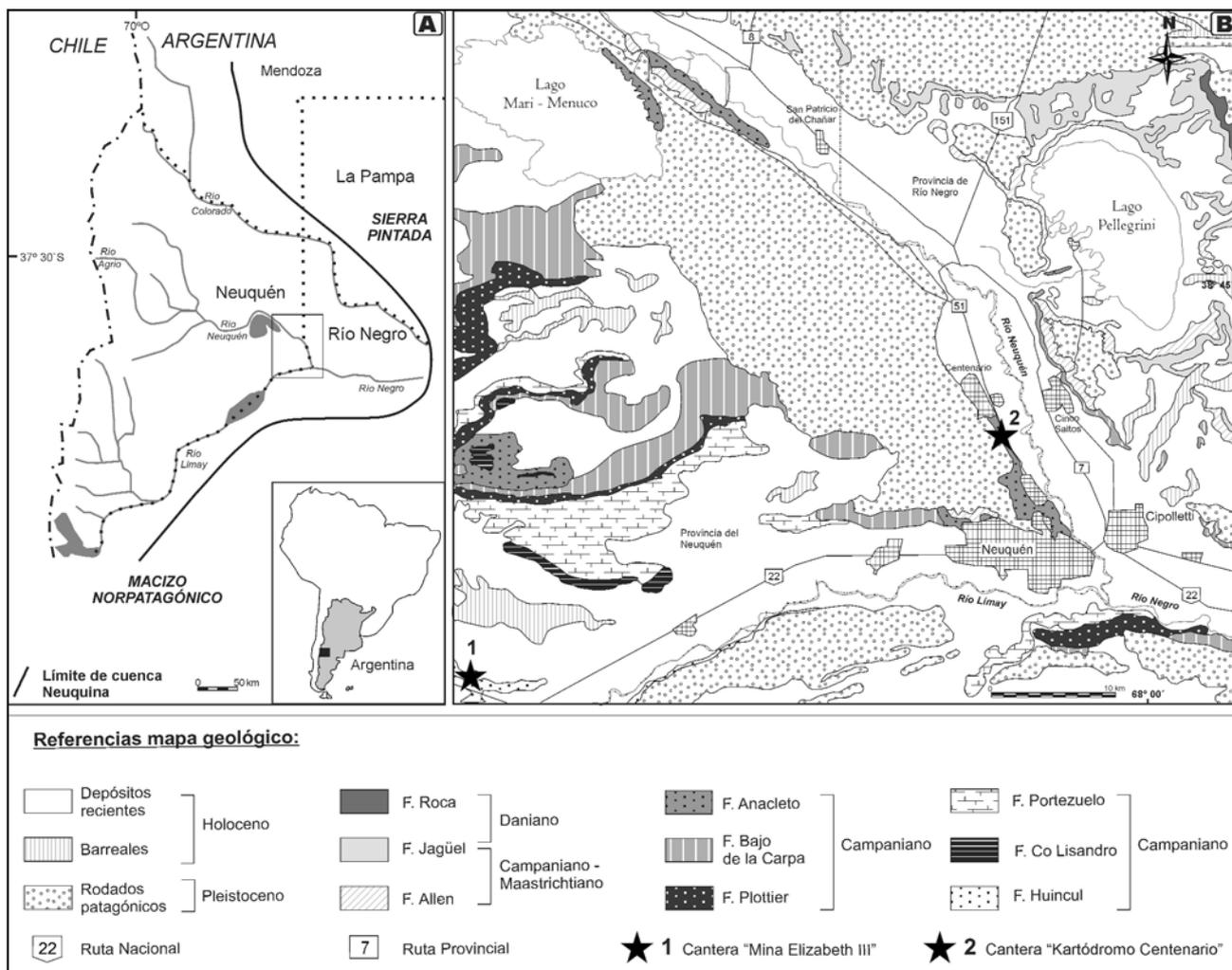


Figura 1. A) Ubicación geográfica del área de estudio; B) Mapa geológico mostrando los afloramientos de las sedimentitas rojas. 1: Localización de Muestra ME, 2: Localización de Muestra KCE.



Figura 2. Vista panorámica de un sector de la cantera Kartódromo Centenario (A) y detalle de los niveles muestreados (B).



Figura 3. Vista panorámica de un sector de la cantera Mina Elizabeth III (A) y detalle del nivel muestreado (B).

Capacidad de Intercambio Catiónico y cationes de intercambio

Este análisis se realizó sobre muestra total a través del método de Plata-Tiourea (Chhabra, et al., 1975), utilizando una solución de 0,1 M AgNO_3/TU (pH = 7). Este método permitió realizar la medición simultánea de la capacidad de intercambio catiónico y los iones intercambiables a través de espectrometría de absorción atómica (EAA).

Granulometría, morfología y distribución del tamaño de poros

La distribución del tamaño de partículas se determinó a través del método de pipeteo, para la fracción menor a 62 μm , y tamizado por vía húmeda para la fracción mayor a 62 μm .

La microfábrica de las muestras se estudió mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Las observaciones se realizaron sobre esquirla de muestra natural y permitieron reconocer las morfologías de las partículas así como las relaciones entre ellas. El material fue secado previamente a 105° C por 24 h con posterior metalización superficial de Au-Pd. Las microfotografías fueron tomadas con magnificaciones de hasta 20000 aumentos en las condiciones operativas de 5Kv y 15 Kv en un microscopio electrónico marca Philips - SEM 515.

La distribución del tamaño de poros se realizó a través de la inyección de mercurio a alta presión utilizando un equipo Micrometrics Autopore III modelo 9420, con una presión máxima de 414 MPa, capaz de medir poros de entre 500 y 0,01 μm de diámetro.

Propiedades Geotécnicas

Sobre los materiales arcillosos estudiados se llevaron a cabo las siguientes determinaciones: límites de Atterberg (ASTM D4318-10, 2010), índice de hinchamiento (ASTM D5890-11, 2011) y peso específico aparente (volumenómetro de Le Chatelier). Previamente a las mediciones de conductividad hidráulica de las mezclas de arcilita y fangolita con arena, se determinaron la humedad óptima y densidad en seco máxima a través de ensayos de compactación proctor estándar (ASTM D698-07 e1, 2007).

Caracterización hidráulica

Arcillas Puras

La conductividad hidráulica de las arcillas puras fue determinada de forma indirecta a través del ensayo de consolidación unidimensional. Para ello, se siguió el procedimiento estándar publicado en la Norma ASTM D2435/D2435M-11 (2011). La arcilita y fangolita en polvo se ensayaron con contenidos de humedad cercanos a la saturación. Las muestras fueron preparadas en celdas de consolidación de pared rígida de 6,33 cm de diámetro y 2,51 cm de altura. El anillo de consolidación se ubicó sobre una piedra porosa de 10 mm de espesor y se colocó papel de filtro a ambos lados de la muestra. Se aplicó la siguiente secuencia de cargas: 0,55 kg/cm^2 , 1,09 kg/cm^2 , 2,74 kg/cm^2 , 5,47 kg/cm^2 , 10,94 kg/cm^2 , utilizando un consolidómetro de anillo fijo (Clockhouse Tipo J217522). En el ensayo de consolidación, la conductividad hidráulica se determinó a partir de la medición de la tasa de flujo de salida, representada por el coeficiente de consolidación C_v (Terzaghi, 1943).

Mezclas arena - arcilita y fangolita.

En la práctica, el porcentaje de arcilla que se utiliza como enmienda de suelos naturales o arenas que se utilicen como barreras impermeables, se encuentra entre un 3 y 15%, por lo que se optó por este último porcentaje para ensayar las mezclas con la arcilita y fangolita seleccionada. Adicionalmente, se determinó la conductividad hidráulica de la arena para cuantificar la disminución en la misma con el agregado de los materiales arcillosos en polvo.

La medición se llevó a cabo mediante ensayos de carga constante en celdas triaxiales de pared flexible, siguiendo la norma DIN 18130-1 (1998). Las probetas se moldearon a un contenido de humedad 3% superior a la óptima realizando ensayos de compactación proctor estándar (ASTM D698-07 e1, 2007). Se aplicó una presión de confinamiento de 0,6 kg/cm^2 y una presión interna de 0,3 kg/cm^2 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis químico y Mineralogía

Las muestras evaluadas presentan como constituyentes principales a los minerales arcillosos (85-90%) (Tabla 1).

Dicha fracción está representada por un interstratificado illita/esmectita (I/S) tipo R0 (50% Sm) e illita, en proporciones similares (55-60% y 40-45%, respectivamente). En la fangolita KCE, se reconoció además la presencia de caolinita en proporciones traza. Los minerales acompañantes son cuarzo, feldspatos, calcita y ceolitas (analcima).

En la Tabla 1 se puede observar que la bentonita sódica utilizada como referencia está constituida casi exclusivamente por esmectita, con cuarzo, feldspatos y ceolitas como fases secundarias.

El análisis químico revela que existe un dominio de sílice y aluminio en las muestras analizadas, principales constituyentes de los minerales arcillosos (Tabla 2). Entre los elementos alcalinos y alcalinotérreos, se observa que la muestra KCE presenta un elevado contenido de Ca^{2+} que puede corresponder tanto a los sitios de intercambio del componente esmectítico del I/S, como a la calcita presente en esta muestra. En la muestra ME se destaca la presencia de K^+ , que puede ser atribuido a la illita y al feldespato potásico identificado en la misma. Por su parte, en la bentonita, el elemento alcalino que predomina es el Na^+ .

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y cationes de intercambio

En la Tabla 3 se presentan los resultados correspondientes a la capacidad de intercambio catiónico y los cationes de intercambio de las muestras estudiadas. La CIC de la bentonita comercial es la más elevada, seguida por la arcilita KCE y por último la fangolita ME. Estos resultados están de acuerdo a la mineralogía de las muestras, siendo esta última la que posee menor porcentaje de minerales arcillosos.

Aunque no hay un criterio ampliamente aceptado para un valor mínimo de CIC del material que se utilice como barrera impermeable de repositorios de RSU, algunos investigadores recomiendan que dicho valor sea mayor o igual a 10 meq/100 g (Rowe *et al.*, 1995; Taha y Kabir, 2003), por lo que la arcilita KCE y la fangolita ME cumplen con este requisito.

Las sedimentitas rojas poseen como principal catión de intercambio al Ca^{2+} , por lo tanto las esmectitas de los interstratificados son clasificadas como cálcicas, mientras que en la bentonita, el 76% de los sitios de intercambio están ocupados por Na^+ .

Tabla 1. Mineralogía de las sedimentitas rojas de las formaciones Anacleto y Huincul y de la bentonita sódica utilizada como referencia. I/S: interstratificado illita/esmectita.

Muestra	Esmectita (%)	I/S (%)	Illita (%)	Caolinita (%)	Cuarzo (%)	Feldspatos (%)	Calcita (%)	Ceolitas (%)
KCE	-	50	40	< 1	5 ± 1	< 1	5	-
ME	-	50	35	-	13 ± 1	< 2	0,4*	< 1
Bentonita sódica	90	-	-	-	2 ± 0,5	< 1	0,4*	3 - 4

* Carbonatos indeterminados

Tabla 2. Composición química de las sedimentitas rojas y de la bentonita sódica.

	KCE	ME	Bentonita
SiO ₂ (%)	56,01	59,74	56,66
Al ₂ O ₃ (%)	13,12	15,33	18,72
Fe ₂ O ₃ (%)	4,89	5,38	4,9
MgO (%)	2,7	1,96	2,68
CaO (%)	6,29	1,4	1,18
Na ₂ O (%)	1,1	2,11	3,11
K ₂ O (%)	1,59	3,43	0,36
TiO ₂ (%)	0,57	0,67	0,43
P ₂ O ₅ (%)	0,12	0	0,093
MnO (%)	0,06	0,08	0,06
Cr ₂ O ₃ (%)	0	0	0,003
Sr (%)	297	252	278,4
Zr (%)	119	247	282
Y (%)	0	0	29
C (%)	0,40	0,02	0,10
S (%)	0,03	0,02	0,56
L.O.I.	13,49	10,08	11,3

Tabla 3. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes de intercambio.

Muestra	CIC (meq/100g)	Cationes de intercambio (%)			
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
KCE	60,14	45,40	13,30	1,90	39,50
ME	41,83	57,40	15,20	2,30	25,10
Bentonita sódica	104,60	12,40	10,90	0,30	76,40

Granulometría, morfología y distribución del tamaño de poros

Los resultados granulométricos permiten clasificar a las muestras como Arcilita (Muestra KCE) y Fangolita (Muestra ME) (Folk, 1968) (Tabla 4). En KCE, la fracción granulométrica que domina es la de tamaño arcilla, mientras que en ME las fracciones limo y arcilla presentan proporciones similares. La fracción arena es muy baja, sólo en ME se observa un mayor contenido, aunque la misma no alcanza el 10% del porcentaje en peso. En términos de tamaño de grano, existe una importante diferencia entre las sedimentitas rojas y la bentonita comercial ya que esta última está constituida casi en su totalidad por partículas menores a 0,98 micrones (Tabla 4).

En la fangolita ME las partículas se hallan dispuestas cara-cara en posición basal y ofreciendo un aspecto de compactación (Figura 4 A y B). En observación con mayor magnificación, también se encontraron aquí placas en contacto borde-cara conformando espacios vacíos de hasta 3 µm de diámetro y de distribución irregular. Las partículas tienen tamaños variables (2-4 µm) con superficies y bordes ligeramente ondulados.

En la arcilita KCE se observaron placas de interestratificados (I/S) dispuestas en su mayoría cara-cara, en posición según sus caras no basales, ofreciendo un aspecto general compacto de láminas apiladas (Figura 4 C y D). Por encima de éstas se encuentran distribuidas irregularmente láminas en contacto borde-cara conformando espacios vacíos de hasta 5 µm y de forma irregular. Los minerales arcillosos tienen un tamaño de 4-5 µm con superficies suavemente escamosas y bordes ligeramente irregulares, morfologías impuestas por la presencia de un alto contenido de capas de esmectita en el interestratificado.

La microfábrica de la bentonita es abierta, típica de montmorillonitas sódicas. Se observa un ordenamiento de las esmectitas en agregados, con forma de rosetas, de alrededor de 4 µm de diámetro. Dichos agregados definen una estructura con importantes espacios vacíos entre ellos del orden de los 6 µm (Figura 4 E y F).

Tanto en las sedimentitas rojas como en la bentonita, el arreglo de las partículas de argilominerales y de minerales no

arcillosos da lugar a micro y macro poros de tamaños entre 500 nm y 5 µm que pueden ser clasificados como poros intra-agregados e inter-agregados (Delage et al., 2006).

En la Figura 5 se presentan las curvas de distribución del tamaño de poros medidos mediante intrusión de mercurio. Todas las muestras exhiben una distribución porométrica caracterizada por la presencia de un tipo principal de poros con un diámetro entre 1 y 0,1 µm (1000-100 nm). En la muestra ME se observa además la presencia de poros entre 1 y 10 µm.

Los resultados obtenidos coinciden en general con lo observado a través de microscopía electrónica. Desde el punto de vista de la movilidad del agua, los poros identificados pueden clasificarse como microporos (poros intra-agregados) (González Fort, 1996) y, en menor medida, como macroporos (poros inter-agregados).

Propiedades Geotécnicas

En función de los resultados granulométricos y límites de Atterberg, la arcilita KCE y la fangolita ME pueden clasificarse como un limo con plasticidad moderada a alta (MH) y una arcilla de plasticidad media a baja (CL), respectivamente, mientras que la bentonita corresponde a una arcilla de alta plasticidad (CH) (Tabla 5). Los valores de los límites de consistencia poseen una alta relación con el tipo de catión de intercambio de las esmectitas. En presencia de agua, el espesor de la doble capa difusa es menor en presencia de Ca²⁺, disminuyendo su capacidad de absorber agua en relación con esmectitas donde predominan los cationes monovalentes (Gleason et al., 1997), como es el caso de la bentonita comercial utilizada como referencia. Por esta misma razón, el índice de hinchamiento de las sedimentitas rojas también es considerablemente más bajo que el de la bentonita (Tabla 5).

Los resultados de los ensayos de compactación de las mezclas con arena se muestran en la Tabla 6. Si bien los valores de densidad en seco fueron similares para los tres materiales, la humedad óptima de las mezclas con las sedimentitas rojas es un 2% más baja que la de la bentonita debido a que poseen una menor proporción de partículas finas.

Tabla 4. Granulometría de las muestras estudiadas (en %).

Muestra	< 0,98 µm	< 1,95 µm	< 3,9 µm	entre 62 µm y 4 µm	entre 500 µm y 62 µm
KCE	44,8	60,1	76,4	23,5	0,4
ME	26,0	38,2	49,8	42,1	8,3
Bentonita sódica	83,9	85,9	87,9	11,2	0,9

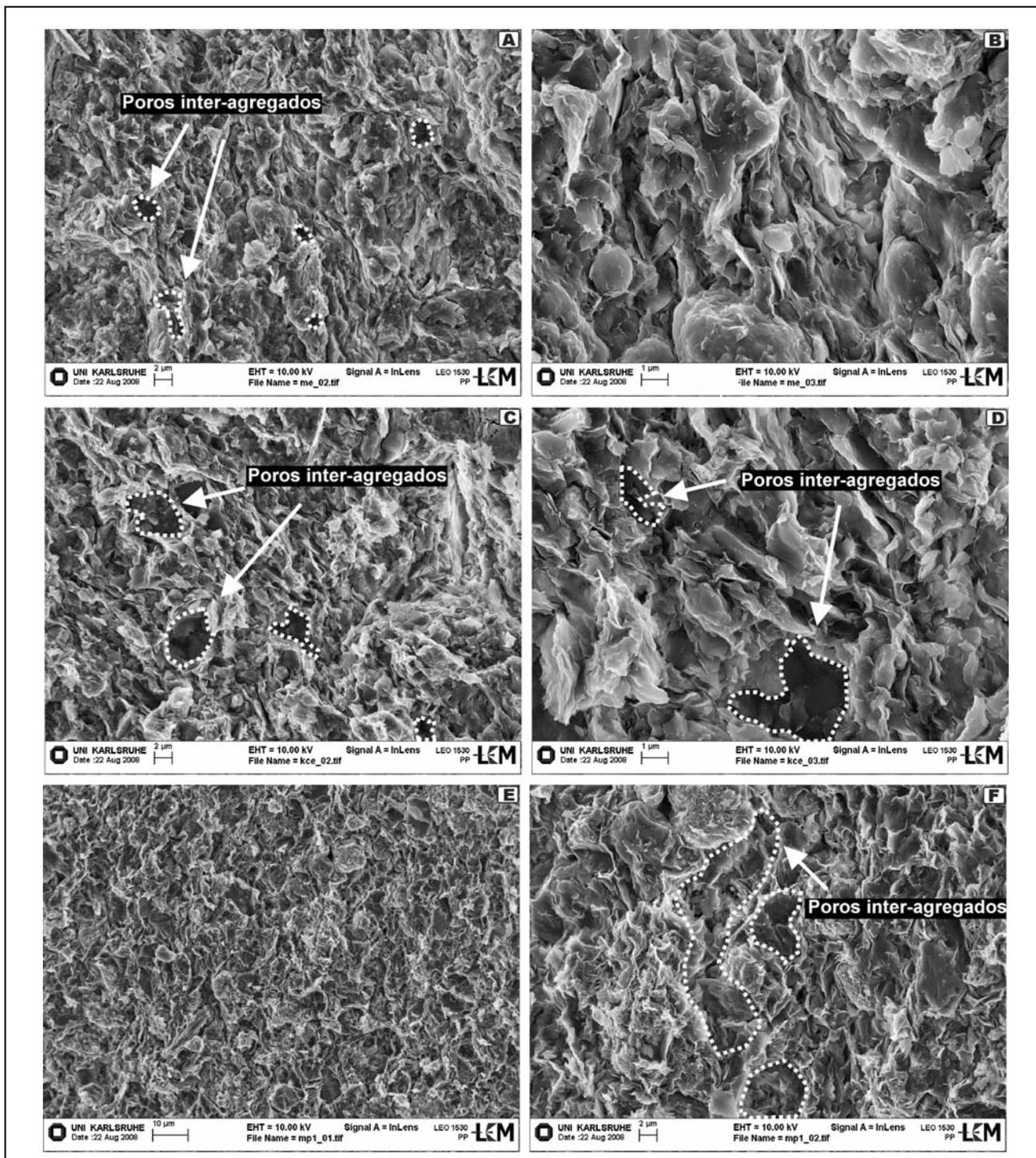


Figura 4. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de las sedimentitas rojas y la bentonita sódica. A y B) Formación Huincul - Muestra ME; C y D) Formación Anacleto - Muestra KCE; E y F) bentonita sódica.

Tabla 5. Propiedades geotécnicas.

Propiedades	KCE	ME	Bentonita sódica
Humedad (%)	8,12	7	11,3
Límite líquido (%)	47	39	340
Índice de plasticidad (%)	11	26	291
Índice de hinchamiento (mL)	9	6	36
Gravedad específica	2,67	2,66	2,7
Unified Soil Classification	MH	CL	CH

Caracterización hidráulica

Arcillas puras

La fangolita ME y la arcilita KCE presentaron valores de conductividad hidráulica por debajo de 1×10^{-9} m/s, y sólo un orden de magnitud mayor que el de la bentonita (Figura 6 b). En los tres materiales, se observa una disminución aproximadamente lineal de la conductividad hidráulica y la relación de vacíos con el aumento de la carga aplicada (Figura 6 a y b). La disminución en la conductividad hidráulica es el resultado de la disminución de la relación de vacíos y reorientación de las partículas del suelo hacia un estado más disperso, que tiene lugar durante el proceso de carga (Cetil, 2004).

La bentonita posee una relación de vacíos tres veces más alta que el resto de los materiales y experimentó el mayor cambio en la misma con el incremento de la carga, mientras que en las sedimentitas rojas la relación de vacíos permaneció casi invariante a lo largo de todo el rango de presiones ensayadas. Estos resultados sugieren que a medida que la carga vertical aumentó, hubo un importante decrecimiento en el volumen de la bentonita con alto hinchamiento, mientras que el volumen de la arcilita KCE y la fangolita ME, que poseen un bajo hinchamiento, mostró una compresibilidad inferior.

Los resultados indican que las sedimentitas rojas estudiadas poseen valores de conductividad hidráulica que cumplen con los requisitos legales, aun sin tener una capacidad de hinchamiento elevada. El análisis de microscopía electrónica muestra que estas sedimentitas están constituidas por una elevada proporción de partículas finas ($< 4 \mu\text{m}$) que dan lugar a un dominio de microporos (poros intra-agregados: interlaminares e interparticulares), los cuales a su vez, definen canales de flujo con diámetros también finos.

Mezclas arena bien graduada - arcilita y fangolita.

La mezcla con la arcilita KCE presentó una conductividad hidráulica un orden de magnitud menor que el límite requerido por la legislación. Por su parte, la mezcla con la fangolita ME de la Formación Huincul fue la de mayor valor de conductividad hidráulica, quedando levemente por encima del valor estipulado por la normativa internacional para materiales que se utilicen como sello de repositorios de residuos sólidos urbanos (Tabla 6).

El agregado de un 15% de la arcilita KCE en polvo a la arena mal seleccionada disminuyó su conductividad hidráulica en seis órdenes de magnitud. Por su parte, la fangolita ME mejoró la conductividad hidráulica de la arena en cinco órdenes de magnitud (Tabla 6).

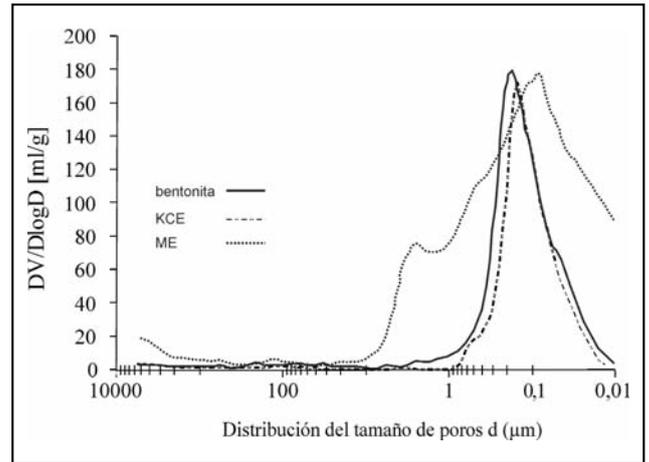


Figura 5. Distribución de tamaño de poros obtenida por intrusión de mercurio. Escala horizontal logarítmica.

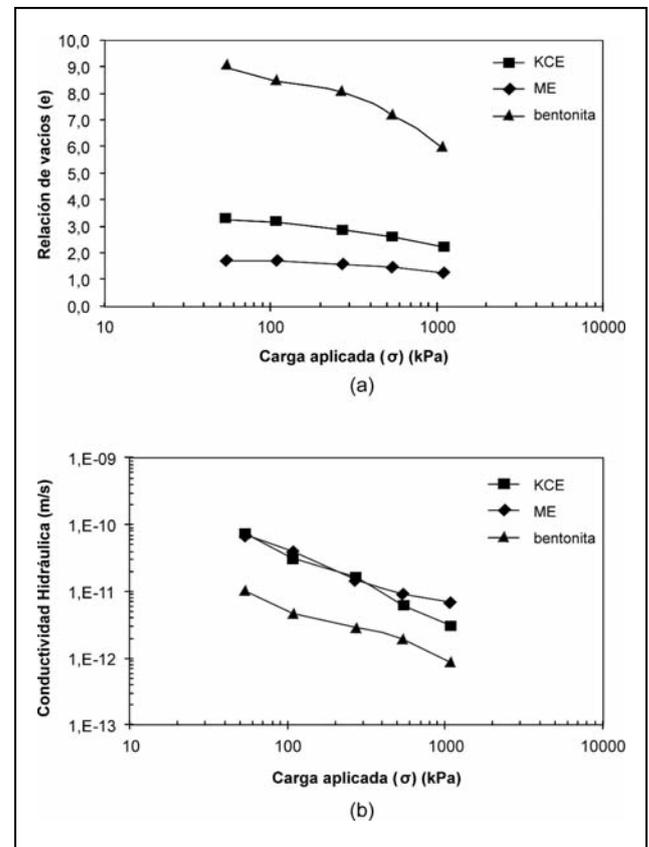


Figura 6. Relación de vacíos (a) y conductividad hidráulica (b) vs carga aplicada. Escala horizontal logarítmica.

Tabla 6. Propiedades de compactación y conductividad hidráulica de las mezclas con arena.

Muestra	Humedad óptima (%)	r_{ap} máxima (kg/m^3)	K (m/s)
Arena (100%)	11	1650	$5,67 \times 10^{-04}$
KCE (15%) - Arena (75%)	12,5	1830	$1,34 \times 10^{-10}$
ME (15%) - Arena (75%)	12	1810	$4,30 \times 10^{-09}$
Bentonita (15%) - Arena (75%)	13	1890	$5,34 \times 10^{-12}$

En las mezclas con arena, el comportamiento de la bentonita fue muy superior al de las pelitas rojas ya que la conductividad hidráulica de la misma se encontró en el mismo orden de magnitud que la obtenida en forma pura, disminuyendo la conductividad hidráulica de la arena en ocho órdenes de magnitud. Estos resultados evidencian que la conductividad hidráulica de las mezclas de pelita-arena compactada está controlada casi exclusivamente por las propiedades de la fracción fina.

En las mezclas bentonita-arena, la bentonita se encuentra entre los granos de arena, recubriéndolos con una fina capa. Cuando este material es expuesto al agua, los vacíos entre los agregados comienzan a ser llenados por geles de arcilla que emanan desde los agregados expandidos (Pusch *et al.*, 1990). Por lo que en mezclas con materiales granulares, la reducción de la conductividad hidráulica depende principalmente de la capacidad que posee la arcilla de hincharse (Komine y Ogata, 1996; Mishra *et al.*, 2011).

Como se observó anteriormente, la bentonita posee un hinchamiento cuatro veces más alto en relación con las sedimentitas rojas, de ahí que la conductividad hidráulica de estas últimas en mezclas con arena sea entre uno y dos órdenes de magnitud más elevado que la bentonita sódica comercial. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Mishra *et al.* (2011) quienes estipulan una disminución de la conductividad hidráulica de mezclas suelo-bentonita desde $5,5 \times 10^{-10}$ m/s a $5,3 \times 10^{-11}$ con un incremento del hinchamiento de 6 a 20 mL/2g.

Comparación entre las propiedades de las sedimentitas rojas y la bentonita sódica

Existen notables diferencias entre las características texturales y mineralógicas de las sedimentitas rojas y la bentonita utilizada como referencia, que se reflejan en su comportamiento geotécnico y fisicoquímico.

En comparación, las sedimentitas rojas poseen porcentajes más bajos de: minerales arcillosos esmectíticos, partículas con tamaño $< 2 \mu\text{m}$ y CIC. Otra diferencia destacada con la bentonita es la presencia de Ca^{2+} como principal catión de intercambio, mientras que esta última se trata de una bentonita sódica. Todas estas propiedades afectaron directamente al índice de plasticidad, hinchamiento y compresibilidad de las sedimentitas rojas dando lugar a valores más bajos de estos parámetros, los que a su vez explican la mayor conductividad hidráulica de estos materiales en relación con la bentonita sódica natural utilizada como referencia.

Aún así, los valores de conductividad hidráulica y de CIC de las sedimentitas rojas las hacen adecuadas para su uso como barreras impermeables. Adicionalmente, estos materiales resultan muy atractivos, desde un punto de vista geotécnico para ser utilizados como sellos de rellenos sanitarios, ya que poseen bajo hinchamiento, por lo que no propiciarían la aparición de fracturas por desecamiento. Por esta razón, podría considerarse su uso sin mezclarse con otros componentes, a diferencia de la bentonita que por su alta compresibilidad y plasticidad sólo puede utilizarse en combinación con otros materiales más estables mecánicamente (Musso *et al.*, 2010).

Su baja actividad y el dominio de Ca^{2+} en los sitios de intercambio también las hacen favorables para este fin ya que algunos investigadores han sugerido que las esmectitas cálcicas podrían ser más estables químicamente que las sódicas cuando son expuestas a los constituyentes químicos de los lixiviados (Gleason *et al.*, 1997).

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizan las principales características físicas, químicas, mineralógicas y geotécnicas de dos sedimentitas rojas de grano fino aflorantes en el Departamento Confluencia, provincia de Neuquén. Este material ha sido antiguamente utilizado como materia prima en la industria de la cerámica. Las principales conclusiones se resumen de la siguiente manera:

- Las sedimentitas rojas compactadas presentan conductividades hidráulicas bajas y muy bajas. Mezclas compactadas de arena bien graduada con un 15% de la fangolita ME de la Formación Huincul poseen conductividades hidráulicas superiores a 1×10^{-9} m/s. Sin embargo, el agregado de un 15% de la arcilita KCE de la Formación Anacleto a esta arena produjo una importante disminución en la conductividad hidráulica de la misma obteniéndose valores por debajo de los mínimos requeridos por la mayoría de las regulaciones internacionales para la construcción de barreras aislantes en rellenos sanitarios.
- Un adecuado comportamiento hidráulico se alcanza cuando las mezclas se encuentran compactadas con una densidad igual al 95% de la densidad máxima obtenida en el ensayo proctor Normal y compactando en la rama húmeda entre 2 y 3% por encima de la humedad óptima de compactación. De esta manera se logran condiciones de estabilidad, un material suficientemente denso y un comportamiento hidráulico óptimo al obtenerse estructuras dispersas en el material compactado en la rama húmeda.
- Las sedimentitas ensayadas poseen una baja compresibilidad y menor potencial expansivo que una bentonita sódica natural de la provincia de Río Negro. Por lo tanto, las mismas podrían ser utilizadas como material de construcción en forma directa sin necesidad de ser mezcladas o estabilizadas con otros materiales naturales (suelos o arena) debido a su baja plasticidad y mayor estabilidad química.
- La capacidad de intercambio catiónico de estas rocas, también las hacen apropiadas para contener líquidos lixiviados. Por su bajo hinchamiento, las sedimentitas rojas estudiadas poseen un bajo potencial de aparición de fisuras al secarse o debido a procesos de intercambio que justifiquen cambios de volumen en la barrera. Estos materiales también serían más estables químicamente en relación con una bentonita sódica debido a su baja actividad y la presencia de Ca^{2+} en los sitios de intercambio.
- La utilización de materiales regionales en la construcción de sistemas de impermeabilización de rellenos sanitarios, constituiría una alternativa de bajo costo como así también ampliaría las posibilidades de comercialización de materias primas que se han utilizado sólo como materiales para la industria de la cerámica, a otros usos tendientes a la protección del medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación de la Universidad Nacional del Comahue, Argentina, (proyecto 04/I107) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2002-07-12633).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ASTM STANDARD D698-07E1, 2007.
Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).
ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/D0698-07E01, www.astm.org.
- ASTM STANDARD D2435/D2435M-11, 2011.
Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Load-ing.
ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/D2435_D2435M-11, www.astm.org.
- ASTM STANDARD D5890-11, 2011.
Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners.
ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/D5890-11, www.astm.org.
- ASTM Standard D4318-10, 2010.
Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, DOI: 10.1520/D4318-10, www.astm.org.
- BENSON, C., H. ZHAI, AND X. WANG. 1994.
Estimating the hydraulic conductivity of compacted clay liners.
Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120: 366-387.
- BISCAYE, P. E., 1965.
Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans:
Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 76: 803-831.
- BONAPARTE, R., 1995.
Long-term performance of landfills.
En Y.B. Acar and D.E. Daniel (eds.), Proceedings, Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication 46, American Society of Civil Engineers, 415-553, Reston, VA.
- BOUAZZA, A. Y VAN IMPE, W.F., 1998.
Liner design for waste disposal sites.
Environmental Geology, Vol. 35(1): 41-54.
- CAZAU, L. Y ULIANA, M., 1973.
El Cretácico Superior continental de la Cuenca Neuquina.
V Congreso de Geología Argentina, Villa Carlos Paz, Córdoba. Actas, Vol. 3: 131-163.
- CETIL, H., 2004.
Soil-particle and pore orientations during consolidation of cohesive soils.
Engineering Geology, Vol. 73: 1-11.
- CHHABRA, R., PLEYSIER, J., CREMERS, A., 1975.
The measurement of the cation exchange capacity and exchangeable cations in soils: A new method.
Proc. Int. Clay Conf., Wilmette, 439 - 449.
- COMISIÓN EUROPEA, 1999.
Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the Landfill of Waste.
Official Journal of the European Union L 182, 16/07/1999, 0001- 0019; Brussels.
- CZURDA, K., 2006.
Clay Liners and Waste Disposal.
En: Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G. (Eds.), Handbook of Clay Science. Developments in Clay Science, Vol. 11.3: 693-702.
- DANDERFER, J.C. Y VERA, P., 1992.
Geología y Recursos Minerales del Departamento Confluencia. Provincia del Neuquén, República Argentina.
Dirección Provincial de Minería, Ministerio de la Producción, Boletín, 1, 212 pp. Neuquén.
- DANIEL, D.E., 1993.
Geotechnical Practice for Waste Disposal.
Chapman and Hall, 675 pp. London.
- DANIELI, J.C. Y GIUSIANO, A., 1992.
Geología y Recursos Minerales del Departamento Confluencia, Provincia del Neuquén, República Argentina.
Dirección Provincial de Minería, Ministerio de la Producción, Boletín, 1, 212 pp. Neuquén.
- DELAGE, P., MARCIAL, D., CUI, Y.J., RUIZ, X., 2006.
Ageing effects in a compacted bentonite: a microstructure approach.
Géotechnique, Vol. 56(5): 291-304.
- DI PAOLA, A. Y MARCHESI, H., 1970.
Relaciones litoestratigráficas entre la Formaciones Rayoso, Candeleros y Huincul, Prov. del Neuquén.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, Vol. 25(1): 111-120.

- DIN 18130-1, 1998.
Soil, Investigation and Testing - Determination of the Coefficient of Water Permeability - Part 1: Laboratory Tests.
Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 20 pp., Berlin (Beuth).
- DIRECCIÓN PROVINCIAL DE MINERÍA, 1978.
Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos de la Provincia del Neuquén.
Disponible en: <http://www.energianeuquen.gov.ar/catastrominero.aspx>. Último acceso: Octubre de 2012.
- DOERING, A., 1882.
Informe oficial de la Comisión Científica agregada al estado mayor general de la expedición al Río Negro (Patagonia).
Geología, Vol. 3: 300-530.
- ESPEJO, P.M. Y NIETO, D.G., 1999.
Geología y Recursos Minerales del sector Rionegrino de las Hojas 3769-IV, Catriel; 3969-II, Neuquén; 3966-I, Gobernador Duval; 3966-II, Puelches y 3963-I, Río Colorado.
Dirección de Minería de Río Negro-SEGEMAR. 49 pp. Viedma.
- FOLK, R.L., 1968.
Petrology of Sedimentary Rocks:
Hemphills Book Store, 170 pp. Texas.
- FRANCISCA F.M., GLATSTEIN D.A., NIEVA P.M., 2009.
Aptitud de los limos compactados y estabilizados con bentonita sódica como material de construcción de barreras en rellenos sanitarios.
Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Vol. 106: 29-34.
- FRENGUELLI, J., 1930.
Nomenclatura estratigráfica Patagónica.
Anales de la Sociedad Científica de Santa Fe, Vol. 3: 1-117.
- GIUSIANO, A. Y LUDUEÑA, D., 1989.
Plan Arcillas-Limos arcillosos del Grupo Neuquén.
Dirección Provincial de Minería del Neuquén. Informe Final. Inédito.
- GLEASON, M.H., DANIEL, D., EYKHOLT, G.R., 1997.
Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications.
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123(5): 438-445.
- GONZÁLEZ FORT, R., 1996.
Análisis del sistema poroso de las rocas.
En: Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico. Editorial Complutense, 493 pp. Madrid, España.
- GROEBER, P., 1953.
Mesozoico. En: Geografía de la República Argentina.
Soc. Arg. de Est. Geográficos GAEA, Buenos Aires, Vol. 2(1): 1-141.
- HEREDIA, S. Y CALVO, J., 2002.
Estratigrafía de las bardas de la ciudad de Neuquén.
XV Congreso Geológico Argentino, El Calafate, Tomo I: 699-705.
- HUGO, C.A. Y LEANZA, H. A., 2001a.
Hoja Geológica 3969-IV, General Roca. Provincias de Río Negro y Neuquén.
Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Boletín 308, 64 pp. Buenos Aires.
- HUGO, C.A. Y LEANZA, H.A., 2001b.
Hoja Geológica 3966-III, Villa Regina, provincia de Río Negro.
Instituto de Geología y Recursos Naturales, SEGEMAR, Boletín 309, 53 pp. Bs. As.
- KEIDEL, J., 1907.
Material para el mapa geológico de la República Argentina. Confluencia de los ríos Neuquén y Currileuvú.
Dir. Nac. Min. y Geol. Mapa impreso escala 1:25000, Bs. As.
- KEITH, K.S., 2000.
Characterization and permeability of sepiolite, palygorskite, and other commercial clays and their applicability for use as impermeable barriers in waste disposal.
PhD Thesis. Indiana University, Department of Geological Sciences, 271 pp.
- KOMINE, H. Y OGATA, N., 1996.
Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite.
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33(1): 11-22.
- LEGARRETA, L. Y GULISANO, C.A., 1989.
Análisis estratigráfico secuencial de la cuenca Neuquina (Triásico superior-Terciario inferior).
10° Congreso Geológico Argentino, Univ. Nac. de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica N° 6, Cuencas Sedimentarias Argentinas. Tucumán, 221-243.

- MANASSERO, M. BENSON, C., BOUAZZA, A., 2000.
Solid waste containment systems.
Proceedings Int. Conf. on Geological and Geotechnical Eng., Geoeng., Vol. 1: 520-642, Melbourne.
- MISHRA, A. K., OHTSUBO, M., LI, L., HIGASHI, T., 2011.
Controlling factors of the swelling of various bentonites and their correlations with the hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures.
Applied Clay Science, Vol. 52: 78-84.
- MOORE, D.M. Y REYNOLDS, R.C., 1997.
X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals.
2 Ed. *Oxford Univ. Press., 378 pp. NY.*
- MUSSO, T.B., ROEHL, K., PETTINARI, G., VALLES, J., 2010.
Assesment of smectite-rich claystones from Northpatagonia for their use as liner materials in landfills.
Applied Clay Science, Vol. 48(3): 438-445.
- OPS, 2002.
Observatorio Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos.
*En: Manejo de residuos sólidos urbanos en Argentina. Disposición final (online). Disp. en web
en: http://www.ambiente.gob.ar/observatoriorsul/informacion_generallen_arg_disposicion_final.html*
- PETTINARI, G., 1995.
Evolución mineralógica de los sedimentos pelíticos del Grupo Neuquén, entre cerro Challacó y Paso Córdoba, provincias del Neuquén y Río Negro, Argentina.
Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Inédito. 156 pp.
- PETTINARI, G., GIUSIANO, A., LUDUEÑA, D., 1999.
Arcillas Rojas del Grupo Neuquén, Neuquén.
En: Recursos Minerales de la República argentina. Editor: Z. O. Zappettini. Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1103-1112, Buenos Aires.
- PETTINARI, G. Y GIUSIANO, A., 2011.
Arcillas Rojas del Grupo Neuquén.
*Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. ISBN 978-987-224003-3-2.
Editores: H. Leanza, C. Arregui, O. Carbone, Juan Danieli, Jorge Vallés. Capítulo: Recursos Minerales: 767-770.*
- PUSCH R., KARLNAND O., HOKMARK H., 1990.
GMM-a general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays.
SKB Technical Report: 90-43, Stockholm, Sweden.
- RAMOS, V., 1981.
Descripción geológica de la Hoja 33c, Los Chihuidos Norte.
Boletín del Servicio Geológico Nacional, Vol. 182: 1-103. Bs. As.
- ROLL, A., 1938.
Observaciones en el Neuquén central (Resumen).
Bol. Inf. Petrol., año 15, Vol. 171: 40-41. Bs. As.
- ROWE, R.K., QUIGLEY, R.M., BOOKER, J.R., 1995.
Clayey Barrier Systems for Water Disposal Facilities.
Chapman and Hall, 390 pp. London.
- SCHULTZ, L.G., 1964.
Quantitative interpretation of mineralogical composition from X-ray and chemical data for the Pierre Shale.
US Geological Survey Professional Paper, Vol. 391: 1-31.
- TAHA, M.R. Y KABIR, M.H., 2003.
Sedimentary residual soils as a hydraulic barrier in waste containment systems.
Second International Conference on Advances in Soft Soil Engineering Technology, Putrajaya, Malaysia, 895-904.
- TERZAGHI, K., 1943.
Theoretical Soil Mechanics,
John Wiley and Sons, 510 pp. New York.
- TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S., 1993.
Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues.
Mc Graw-Hill, 978 pp. Madrid, España.
- ULIANA, M. Y DELLAPÉ, D., 1981.
Estratigrafía y evolución paleoambiental de la sucesión Maastrichtiano- Eoterciaria del engolfamiento neuquino (Patagonia Septentrional).
Actas 8º Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, Vol. 3: 673-711.

U.S. EPA, 1993.

Solid Waste Disposal Facility Criteria Technical Manual. Environmental Protection Emergency Response.
EPA530-R-93-017. Agency (5305). www.epa.gov/osw.

WICHMANN, R., 1927.

Los estratos con Dinosaurios y su techo en el Este del Territorio del Neuquén.
Dirección General de Minería, Geología e Hidrología, Buenos Aires, Vol. 32: 3-25.