

Arcillas expansivas del Norte de Venezuela: Caracterización mediante el uso de los límites de Atterberg, índices de consistencia y ensayos de expansión

Expansive clays from Northern Venezuela: Characterization using Atterberg limits, consistency indices and expansion tests

Fecha de entrega: 11 de mayo 2023

Fecha de aceptación: 10 de noviembre 2023

Carlos López-Niño¹, Elio Guevara¹, Víctor León¹ y Danilo López-Hernández²

¹ Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas, Venezuela, carln88@gmail.com, elioguevara84@gmail.com, victorleonm@gmail.com

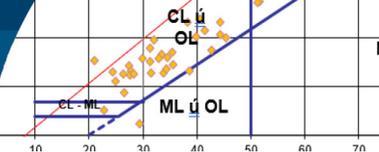
² Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Caracas, Venezuela, ivandaniolopez@gmail.com

La franja litoral norte de Venezuela con acentuado clima semiárido presenta condiciones para que se desarrollen extensas zonas con presencia de arcillas expansivas, lo que genera la principal patología de sus vías de comunicación por deformación en las obras civiles circundantes. En esta contribución se caracteriza la presencia de arcillas expansivas al norte de Venezuela en 81 muestras distribuidas en varios estados del país. El estudio incluyó la determinación de las propiedades geomecánicas mediante: i) ensayos de campo y ii) análisis de laboratorio de los límites de Atterberg, índices de consistencias y ensayos de expansión, así como la relación entre los índices y la información de ensayos con edómetros. La granulometría típica de los suelos es principalmente fina (limos y arcillas): en el estado Anzoátegui el promedio del contenido de granos finos es de 86%, mientras que en Falcón y Miranda son un poco menores, 82% y 67% respectivamente. En general, el índice de plasticidad (IP) de estas arcillas expansivas es mediano a alto, con un promedio de 23, aunque la región del estado Falcón presentó un promedio mediano (18). Las correlaciones entre la presión de expansión e IP demostraron una alta asociación. Estos resultados corroboran que el criterio usado para evaluar el Potencial de Expansión de un suelo arcilloso basado en el IP propuesto por Chen (1988), es bastante apropiado para ser usado en el estudio e identificación del comportamiento expansivo de estos suelos.

Palabras clave: límite líquido, índice de plasticidad, hinchamiento, arcilla expansiva

The northern coastal strip of Venezuela with a semi-arid climate presents conditions for the development of extensive areas with the presence of expansive clays, and, this is the main pathology of its communication routes due to deformation in the surrounding civil works. This contribution characterizes the presence of expansive clays in northern Venezuela in 81 samples distributed in several states of the country. The study included the determination of geomechanical properties through field work and laboratory tests by Atterberg limits, consistency indices and expansion tests as well as the relationship between the indexes and information from edometer tests. The soil grain size is mainly fine (silts and clays), in the Anzoátegui state the average content of fine grains is 86%, while in Falcón and Miranda they are a little lower, 82% and 67%, respectively. In general, the plasticity index (PI) of these expansive clays is high, with an overall average of 23, although the region of Falcón state presented a moderate average (18). The correlations between the expansion pressure and the PI showed a high correlation. These results corroborate that the criterion used to evaluate the Expansion Potential of a clay soil based on the PI proposed by Chen (1988), is a fairly adequate criterion to be used in the study and identification of the expansive behavior of these types of soils.

Keywords: liquid limit, plasticity index, swelling, expansive clay



Introducción

Las arcillas expansivas (AE) se encuentran localizadas en diversas zonas templadas, subtropicales y tropicales del globo terráqueo (Shi *et al.*, 2002; Rodríguez Castiblanco, 2014; Vorwerk *et al.*, 2015; Rodríguez, 2020; López-Hernández *et al.*, 2022). Estas arcillas se caracterizan por presentar en su composición mineralógica una importante proporción de filosilicatos tipo 2:1, que les proporcionan una alta capacidad de expansión como consecuencia del emplazamiento de moléculas de agua entre las láminas de los silicatos. El agua al adsorberse en estos suelos arcillosos, a su vez, induce un incremento de volumen, el cual depende básicamente de la correspondiente composición mineralógica. Dentro del grupo de las arcillas expansivas las más representativas son: la esméctica, bentonita, montmorillonita, beidelita, vermiculita, atapulgita, nontronita, y clorita (Patel, 2019).

Desde un punto de vista geotécnico, muchos suelos arcillosos son capaces de deformarse en forma anómala debido al cambio volumétrico que se induce por la expansión. Estos cambios, que pueden abarcar amplias superficies, generan daños a las obras de infraestructura como consecuencia de movimientos diferenciales perjudiciales, aunque también en taludes aparentemente estables, las expansiones pueden generar movimientos en masa (Rodríguez Castiblanco, 2014). Así, los suelos expansivos o arcillosos-expansivos son considerados como altamente problemáticos ya que causan daños a las estructuras de ingeniería civil debido a su potencial de expansión y contracción al entrar en contacto con el agua (Kalantari, 2012).

Aunque los suelos expansivos pueden encontrarse en cualquier clima, en las regiones de clima árido y semiárido, donde la evaporación excede la precipitación, se favorece la génesis de arcillas expansivas (Ng y Menzies, 2007; Rodríguez Castiblanco, 2014). En Venezuela, particularmente en la parte norte costera del país (Región Caribe), de clima semi-árido, se presentan condiciones favorables para el desarrollo de suelos con presencia de arcillas expansivas. No obstante ello, en la parte sur occidental del país, en la región de los llanos inundados (con mayor aporte de lluvias, 1400-2000 mm/año), igualmente se anota la abundancia de suelos arcillosos del tipo vertisol (Prieto y López-Hernández, 1984; López-

Hernández, 2019).

La presencia de arcillas expansivas en la parte norte del país es la principal patología que registra la infraestructura vial de algunos sectores de los estados Anzoátegui, Falcón y Miranda. Estos estados presentan problemas de deterioro y deformación de algunas arterias viales e infraestructuras aledañas, como son los casos de la carretera Barcelona-Cantaura en Anzoátegui, Morón-Mirimire en Falcón, y Ocumare-Charallave y Charallave-Santa Teresa en Miranda, existiendo distintos grados de deterioro en las vías mencionadas.

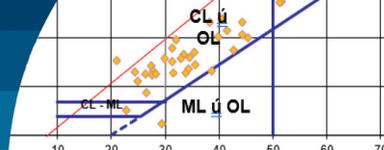
El potencial de expansión se puede determinar bien directamente en el laboratorio realizando pruebas de expansión-consolidación en un edómetro o bien predecir indirectamente a partir de las propiedades del suelo y valores de los índices de Atterberg tales como el índice de plasticidad, el contenido de arcilla, el índice de actividad (arcillas) y el índice de contracción, parámetros que sólo mantienen una relación indirecta con el grado de hinchazón (Zumraw, 2013). Basándose en datos experimentales, algunos investigadores han propuesto relaciones para el potencial de hinchazón que involucran tanto las condiciones originales del sedimento como sus propiedades índices (Seed *et al.*, 1962; Rao *et al.*, 2004).

La presente investigación tiene como principal objetivo la evaluación de la presencia de arcillas expansivas en el norte de Venezuela, tomando como referencia carreteras ubicadas en los estados Anzoátegui, Falcón y Miranda. El estudio incluyó la determinación de las propiedades geomecánicas de los suelos a través ensayos de campo y laboratorio como un aporte preliminar al manejo de sus patologías en obras civiles. Las metodologías a estudiar incluirán los límites de Atterberg, índices de consistencias y ensayos de expansión, así como la relación entre los parámetros índices y los valores obtenidos en ensayos con edómetros.

Localización y extensión del área de estudio

La zona de estudio comprende tres localidades al norte de Venezuela como se observa en la Figura 1.

Tramo Edo Anzoátegui: comprende un trecho de carretera desde Barcelona (coordenadas UTM 314.616E-1.120.600N) hasta Cantaura (UTM 350.135E-1.028.658N), el trayecto



es de aproximadamente 120 km de largo y abarca las cartas topográficas del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar IGVS, a escala 1:100.000: 7244, 7245, 7246, 7343, 7444.

Tramo Edo Falcón: comprende un tramo de carretera desde Morón (coordenadas UTM 587.090E-1.159.054N) hasta Mirimire (UTM 491.530E-1.255.216N), el trayecto es de aproximadamente 150 km de largo y abarca las cartas topográficas IGVS a escala 1:100.000: 6448, 6449, 6547, 6548.

Tramo Edo Miranda: comprende dos tramos de carretera, el primero va desde Charallave (UTM 734.166E-1.133.063N) hasta Ocumare (UTM 634.953E-1.156.505N), este trayecto es de aproximadamente 20 km de largo; el segundo va desde Santa Teresa (UTM 755.774E- 1.131.590N) hasta Charallave, el trayecto es de aproximadamente 25 km de largo y abarca la carta topográfica IGVS a escala 1:100.000: 6846.

las secuencias lutíticas dominantes (entre 80% y 95%) moteadas, abigarradas, monótonas. Cambios laterales rápidos de litofacies en estos sedimentos continentales a marinos muy marginal son características de la Formación. Se extiende por la parte nororiental y norcentral de Anzoátegui.

Formación Las Piedras (Mioceno Tardío-Plioceno). Son areniscas micáceas, friables, de grano fino y colores gris claro a gris verdoso, interlaminaadas con lutitas grises y lutitas ligníticas. También se encuentran algunas calizas arenosas duras y de color verde. La Formación aflora en la porción septentrional de los estados Anzoátegui y Monagas.

Estado Falcón: Formación Guacharaca (Oligoceno). La formación consiste en lutitas y arcillitas con frecuentes interestratificaciones de capas delgadas de arenisca de grano fino, seguidas de margas y arcillas. Se extiende en Falcón oriental, en el alto de Guacharaca, campo de Mene de Acosta y al sur de Mirimire.

Formación Casupial (Oligoceno-Mioceno Medio). La formación se divide en dos miembros: el inferior se caracteriza por la predominancia de areniscas de grano fino y arcillas, la presencia de material carbonoso y por la estratificación en capas delgadas a medias. El miembro superior contiene areniscas de grano grueso y conglomerados, menos material carbonoso, ausencia de carbones y estratificación en capas masivas. En términos generales la Formación se hace de grano más grueso hacia el tope. Se extiende por el margen surcentral y suroriental de la cuenca de Falcón y entre los ríos Tocuyo y Aroa.

Formación San Lorenzo (Mioceno Temprano a Medio). La Formación se subdivide en dos miembros: el inferior El Salto consiste en capas lenticulares de arenisca de grano medio de hasta 10 m de espesor, intercaladas con lutitas limolíticas y limolitas gris-azules; el miembro superior Menecito consiste de una sucesión uniforme de lutitas de color gris a gris-azuloso, con algunas capas de lutitas.

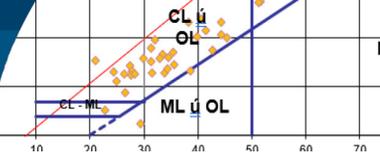
Estado Miranda: Formación Tuy (Plioceno-Pleistoceno). La Formación Tuy se caracteriza por una intercalación de capas gruesas de arenisca heterogéneas y conglomerados líticos mal consolidados con matriz limo arcillosa abundante y a veces con cemento calcáreo, intercaladas con lutitas y cantidades menores de margas y areniscas,



Figura 1: Ubicación de las zonas estudiadas, al este corresponde al Estado Anzoátegui, al centro a Miranda y la más occidental al estado Falcón (tomado y modificado de Google Maps®)

Geología de las áreas de estudio

Estado Anzoátegui: Formación Quiamare (Mioceno Temprano-Tardío). Es una secuencia monótona de lutitas gris verdosas, rojas pardas y gris-azulado, con intercalación de areniscas guijarrosas, lutitas carbonáceas y lignito en capas lenticulares. Un carácter distintivo lo constituyen



la formación cubre aproximadamente el 70% de la cuenca Santa Lucía Ocumare del Tuy, en una poligonal con vértices en Santa Lucía, Santa Teresa, Ocumare del Tuy, Cúa, Charallave y Suapire.

Formación Tucutunemo (Cretácico Tardío). Consiste en filitas y filitas esquistosas, cuarzo-cericíticas, metaconglomerados con cantos volcánicos y de cuarzo, lentes de caliza recristalizada y metagrawacas. La Formación se extiende en la región de Los Teques-Cúa en el estado Miranda.

Materiales y métodos

Granulometría por tamizado

El ensayo fue realizado por tamizado según la norma ASTM D6913 (2017) para lo cual se toma una porción representativa de la muestra y se lava por el tamiz N° 200 para retener solo las partículas granulares, se seca el sobrante en la estufa a 105°C. Se arreglan los tamices en un tambor vibratorio en orden de mayor abertura hacia el tope y menor abertura hacia la base. Después de someter a la muestra a un tamizado vibratorio por 10 min aproximadamente, se calcula el peso de las partículas retenidas en cada tamiz.

Límites de consistencia de Atterberg

El Límite Líquido (LL) fue determinado mediante el uso de la cuchara de Casagrande según la norma ASTM D4318 (2017). Corresponde al contenido de humedad que presenta el suelo cuando dos secciones moldeadas de una muestra separadas por una ranura de dimensiones estándar alcanzan apenas a tocarse, sin llegar a unirse, al someterlas al impacto de 25 golpes en la cuchara Casagrande. El Límite Plástico (LP) también fue realizado atendiendo la norma ASTM D4318 (2017), el método consiste en realizar con una muestra de suelo moldeable (dependerá del tipo de suelo arcilloso y la humedad del mismo) tubos o cilindros alargados de un espesor de aproximadamente 3.0 mm, al comenzar a agrietarse el suelo, el valor del porcentaje de humedad en ese instante representa el límite plástico. El Límite de Contracción (LC), es el límite entre los estados semi-sólido y sólido, o el punto límite de agua en que el suelo deja de disminuir su volumen al seguirse secando. Este ensayo se realizó cumpliendo la norma ASTM D427 (2004).

Porcentaje de humedad en los límites de Atterberg

El contenido de agua en los límites de Atterberg fue medido según norma ASTM D2216 (2019) mediante secado del suelo al horno. Luego de pesar la muestra, se coloca en una estufa y se calienta a 105°C durante 16-24 horas aproximadamente. Una vez secado el suelo se vuelve a pesar. La diferencia entre estos dos valores es el peso del agua en la muestra.

Índices de consistencia

El índice de plasticidad (IP) es un rango de consistencia en el que el suelo exhibe propiedades plásticas o se comporta como material plástico, es una medida de su capacidad de desarrollar cohesión. El IP corresponde al valor numérico de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

El Índice de Friabilidad (IF). Un suelo friable se caracteriza por presentar facilidad de fragmentación de agregados/ terrones grandes y dificultad para la fragmentación de agregados menores en elementos más pequeños. La friabilidad del suelo es de vital importancia para la producción de cultivos y el impacto de las técnicas de producción de cultivos sobre el medio ambiente. El Índice de Friabilidad (IF) se determinó con la diferencia entre el límite plástico y el límite de contracción. El índice de contracción (IC) es el rango de consistencia en el que el suelo se encuentra en un estado semisólido. Se define como la diferencia numérica del límite líquido y el límite de contracción.

Presión de expansión

Se conoce como presión de expansión a la presión que ejerce un suelo arcilloso sobre una superficie al hidratarse y luego expandirse. Se consideraron algunos criterios propuestos por diferentes autores para identificar el potencial de expansión, seleccionándose finalmente el criterio presentado en la Tabla 1, basado en el Índice de Plasticidad propuesto por Chen (1988). Este ensayo se llevó a cabo de acuerdo a Das (2006), consiste en colocar una muestra en un anillo de consolidación, llevarla a un edómetro y agregar agua, cuando la muestra empieza expandirse se aplican cargas sucesivas para impedir la expansión de la muestra, una vez que esta deja de expandir la presión de expansión es el total de la suma de las cargas colocadas.

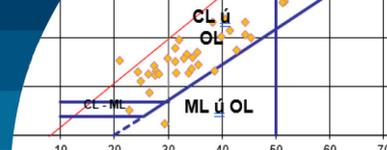


Tabla 1: Potencial de expansión según Chen (1988)

Potencial de Expansión (PE)	Índice de Plasticidad IP, %
Bajo	$IP \leq 15$
Medio	$10 \leq IP \leq 35$
Alto	$20 \leq IP \leq 55$
Muy Alto	$IP \geq 35$

Ensayo de expansión libre

El ensayo se realizó según la norma ASTM D4546 (2021), consiste en colocar una muestra en un anillo de consolidación bajo una pequeña carga de 0.05 kg, llevar a un consolidómetro, agregar agua y medir el aumento de volumen hasta que alcanza el equilibrio. La expansión libre se define, como el máximo hinchamiento vertical, que sufre una muestra de suelo colocado en el consolidómetro en condición sumergida al aplicarle una presión de 10 kPa.

Análisis estadístico

Valores de estadística descriptiva, incluidos los valores mínimos, máximos y desviaciones estándar (DE) se calcularon utilizando SPSS. El coeficiente de variación (CV) fue empleado para explorar la variabilidad de los parámetros y propiedades seleccionados en las áreas de estudio. Las relaciones estadísticas entre los valores de los límites de Atterberg, los índices de consistencia y los ensayos de expansión del suelo fueron establecidas mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

Resultados Geología local

El trabajo se divide en tres zonas localizadas al norte de Venezuela, en cada sector se recolectaron muestras descritas en campo, haciendo énfasis en sus propiedades más características. En total 81 muestras, de las cuales 41 fueron recolectadas en la carretera Barcelona-Cantaura, 23 en la Morón-Mirimire, 10 en la Charallave-Ocumare y 7 en la Charallave-Santa Teresa.

Carretera Barcelona - Cantaura

Al evaluar las características de la litología de la zona se puede dividir en dos unidades: una donde se observa una intercalación de lutitas con areniscas (unidad BC-1, ver Foto 1) y otra donde se observan suelos arcillosos (BC-2). Mayores detalles sobre la geología local se encuentran en

López y Guevara (2012).



Foto 1: Rocas de la unidad BC-1, intercalación de lutitas y areniscas. A: Areniscas, L: Lutitas

Carretera Morón - Mirimire

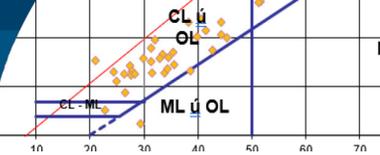
La zona se puede dividir en tres unidades, una primera donde se observan suelos arenosos (Unidad MM-1), otra de suelos arcillosos (MM-2, ver Foto 2), la tercera son areniscas y gravas (MM-3).



Foto 2: Suelos de la unidad MM-2b

Carretera Charallave - Ocumare

Comprende la unidad CO-1 donde se encuentran entre los puntos ChO-1 hasta ChO-10, se define como lutitas de un color fresco gris oscuro y color meteorizado marrón con algunas tonalidades de amarillo y rojo, son muy compactas, se puede correlacionar con la Formación Tuy descrita en la literatura; en la zona se encuentra abundante vegetación



herbácea y arbórea, con procesos geomorfológicos de remoción en masa y erosión hídrica incipiente (ver Foto 3).



Foto 3: Vista panorámica de la morfología del afloramiento ChO-04 de la unidad CO-1

Carretera Charallave - Santa Teresa

Unidad CST-1. Consiste de afloramientos desde ChSt-01 hasta ChSt-07, son principalmente lutitas de un color fresco gris y color meteorizado marrón, compactas; se encuentra abundante vegetación en la zona, tipo herbácea y arbórea, con procesos geomorfológicos de remoción en masa y erosión hídrica incipiente a activa. Los suelos son de humedad intermedia a baja, de granulometría y textura fina, cohesivos, de plasticidad y friabilidad variable, algunos presentan material carbonático.

Caracterización física de los suelos

Granulometría

Este ensayo realizado para las 81 muestras señala que los suelos son principalmente mal gradados, dominados particularmente por sedimentos finos (tamaño arcilla), por lo tanto, sus propiedades mecánicas pueden ser deficientes. Al comparar la granulometría del total de las carreteras estudiadas se puede identificar que todas poseen suelos principalmente de texturas finas (Figura 2). Los de los estados Anzoátegui y Falcón presentan contenidos en promedio de partículas finas muy similares (86% y 82%, respectivamente), así como de arenas y gravas, aunque en promedio los suelos de la carretera Barcelona-Cantaura son un poco más finos que los de la carretera Morón-Mirimire. Los suelos del estado Miranda son más heterogéneos que los de las otras dos zonas, sus contenidos en gravas y arenas

son mucho mayores y por consiguiente sus contenidos de partículas finas menor (67%).

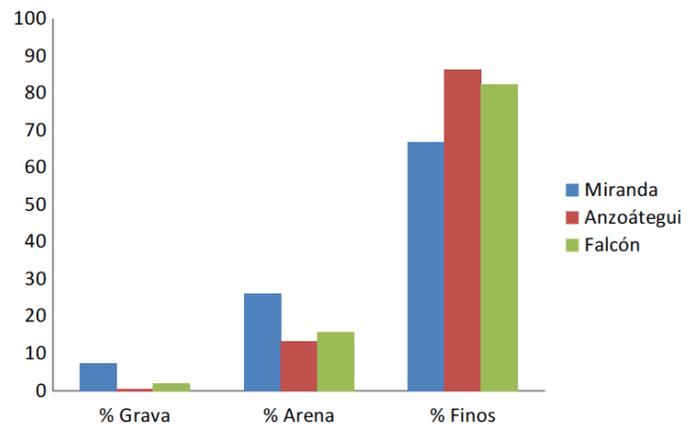


Figura 2: Tamaño promedio de partículas por zonas

Límites de Atterberg de las muestras

La Tabla 2 resume la información para los límites de Atterberg (LL, LP y LC) y los índices de consistencia (IP, IF e IC) para todas las regiones estudiadas.

Límite Líquido

Los valores mayores del límite líquido se presentaron en el estado Miranda (carretera Morón - Mirimire) con un promedio bastante alto de 58.05, mientras que las carreteras de los estados Anzoátegui y Falcón presentaron un promedio similar, más bajo (38.00-38.73). El coeficiente de variación para todos los sitios estudiados del LL fue moderado (0.23-0.31, según Tabla 2).

Límite Plástico

El límite plástico (LP) presenta valores promedios altos de 21.25 y 25.33 en Miranda y Falcón, respectivamente, mientras que Anzoátegui el promedio alcanzó 18.24 un valor medio a alto del LP. Los valores del coeficiente de variación fueron ligeramente más bajos que los obtenidos para el LL.

Límite de Contracción

Los promedios del LC para las carreteras de los estados Miranda y Falcón son bastante similares (27.16 y 26.10, respectivamente) un poco superior a la de Anzoátegui (22.59). El coeficiente de variación de Anzoátegui fue

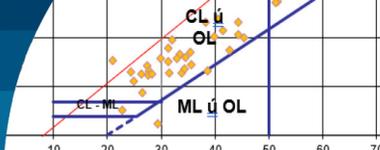


Tabla 2: Estadística descriptiva y valores promedios de los límites de Atterberg e índices de consolidación en los diferentes sitios estudiados

Ubicación	Valores	LL, %	LP, %	LC, %	IP	IF	IC
Anzoátegui	Máximo	73.14	26.98	75.43	48.14	50.43	37.55
	Mínimo	20.93	5.47	16.39	2.46	-10.22	-2.29
	Promedio	38.00	18.24	22.59	19.75	4.35	15.41
	DE	11.77	4.80	9.09	9.97	8.83	9.73
	CV	0.31	0.26	0.40	0.50	2.03	0.63
Miranda	Máximo	78.88	35.11	32.95	50.66	11.84	55.88
	Mínimo	32.52	19.70	16.93	12.83	-12.27	6.06
	Promedio	58,05	25.33	27.16	32.72	1.83	30.89
	DE	13.12	3.85	5.04	11.16	5.97	13.37
	CV	0.23	0.15	0.19	0.34	3.26	0.43
Falcón	Máximo	68.25	26.09	34.75	43.25	16.32	33.50
	Mínimo	28.90	9.85	18.80	2.81	-0.89	3.70
	Promedio	38.73	21.25	26.10	17.49	4.85	12.64
	DE	9.93	5.03	4.36	10.25	4.85	7.97
	CV	0.26	0.24	0.17	0.59	1.00	0.63
Todos los sitios	Máximo	78.88	35.11	75.43	50.66	50.43	55.88
	Mínimo	20.93	5.47	16.39	2.46	-12.27	-2.29
	Promedio	43.61	20.76	24.51	22.85	3.76	19.01
	DE	14.69	5.47	7.62	11.93	7.50	12.75
	CV	0.34	0.26	0.31	0.52	1.99	0.67

DE: Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación

superior (0.40) debido a la presencia de una muestra con un valor muy alto (BaCa-63 con 75.43 de LC), al contrario, en los estados Miranda y Falcón el CV de LC fue de 0.19-0.17, respectivamente.

Índices de Consistencia

Índice de Plasticidad

Los índices de plasticidad de las muestras recolectadas en el Estado Falcón, carretera Morón-Mirimire, van desde 2.81 hasta 43.25 (Tabla 2), siendo este último valor bastante alto, la mayoría de las muestras presentan IP superiores a 30, lo que señala que las muestras de esta zona son bastante plásticas, solo dos de las muestras recolectadas no tienen IP. El promedio general del IP obtenido para esta carretera es de 17.49%, el cual se considera mediano a alto.

En el Estado Anzoátegui, carretera Barcelona-Cantaura, se observan en general valores de IP ampliamente distribuidos, los IP van desde 2.46, valor considerado muy bajo, hasta un IP de 48.14 (Tabla 2), bastante alto. La mayoría de los valores están entre 10 y 30, lo que evidencia que se pueden esperar distintos comportamientos respecto a la plasticidad en esta zona, el promedio general de los IP obtenidos para esta carretera es de 19.75%; considerado como mediano a alto.

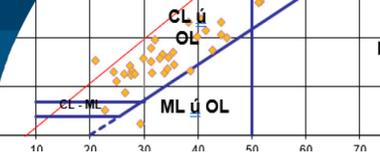
En el estado Miranda los valores de IP de las muestras en las carreteras Charallave-Ocumare y Charallave-Santa Teresa van desde 12.83 bajo, hasta 50.66. Los valores de IP para las muestras recolectadas en este estado también son bastante heterogéneos, mientras que dos de las muestras estudiadas no presentaron IP. El promedio general de los IP en el estado Miranda es alto (32.72, según Tabla 2).

Índice de Friabilidad

Los IF de las carreteras del estado Miranda son muy bajos con promedio de 1.83 (Tabla 2), mientras que para Anzoátegui y Falcón los IF, aunque también bajos, fueron un poco superiores entre 4.35-4.85. Para algunas muestras los valores de IF fueron negativos, de manera que, en general, los CV de todos los sitios estudiados fueron muy altos.

Índice de Contracción

El índice de contracción de los suelos del estado Miranda es alto (promedio de 30.89) y muy superior al encontrado para Anzoátegui y Falcón con valores similares (15.41 y 12.64, respectivamente). En Anzoátegui una de la muestra presentó un IC negativo (-2.29).



Cartas de plasticidad

El límite líquido y el índice plástico propuestos por Atterberg son parámetros físicos fáciles de obtener en el laboratorio, Casagrande en 1932 estudió la relación entre ambos parámetros para un amplio universo de muestras de suelo, logrando así una separación adecuada de arcillas y limos; la gráfica resultante de esa relación, es actualmente de uso generalizado, y se conoce como la Carta de Plasticidad para el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). A continuación, se muestran tres gráficas que representan la relación entre IP y LL del conjunto de muestras de cada zona; las muestras están representadas sobre las gráficas por rombos color naranja.

En la Figura 3 se observa para el estado Falcón, dos grupos bien definidos en la carta de plasticidad para el conjunto de muestras ahí estudiadas, un grupo mayoritario ubicado en el área de arcillas de alta plasticidad (CH), otro grupo en el área de arcillas de baja plasticidad (CL), y solo dos muestras en el límite entre arcillas de alta plasticidad (CH) y limos de alta plasticidad (MH). Resumiendo, las muestras tomadas en el estado Falcón son en general muy plásticas, mayoritariamente arcillas de alta plasticidad (CH).

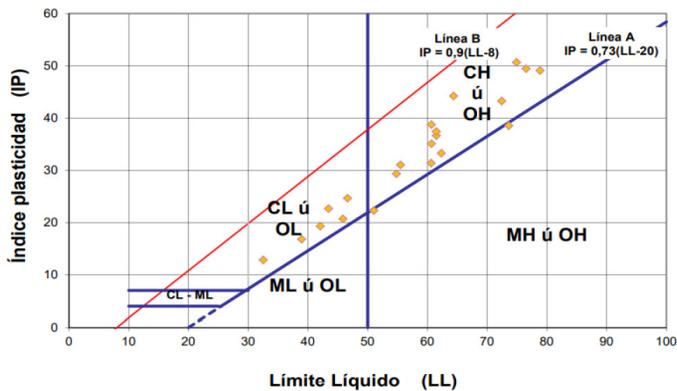


Figura 3: Carta de plasticidad de las muestras escogidas en Falcón.

En el estado Anzoátegui (Figura 4), se observan dos grupos bien definidos en la carta de plasticidad, un grupo claramente mayoritario ubicado en el área de arcillas de baja plasticidad (CL), otro grupo menos significativo en el área de arcillas de alta plasticidad (CH), una muestra sobre los limos de baja plasticidad (ML) y otra muestra clasificada como una arcilla limosa (CL-ML). Los sedimentos tomados en el estado Anzoátegui son en

general poco plásticos, mayoritariamente arcillas de baja plasticidad (CL).

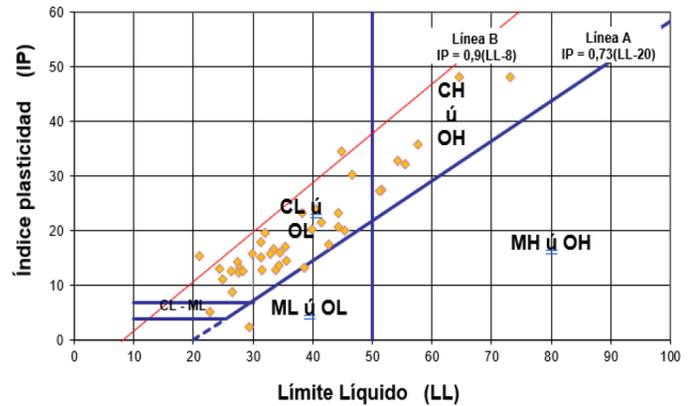


Figura 4: Carta de plasticidad de las muestras de Anzoátegui

La Figura 5 muestra la carta de plasticidad para el conjunto de muestras tomadas en el estado Miranda. Se observa un grupo claramente mayoritario ubicado en el área de arcillas de baja plasticidad (CL), otro grupo menos significativo en el área de limos de baja plasticidad (ML) y solo una muestra sobre las arcillas de alta plasticidad (CH). Las muestras tomadas en Miranda son en general poco plásticas, principalmente arcillas de baja plasticidad (CL).

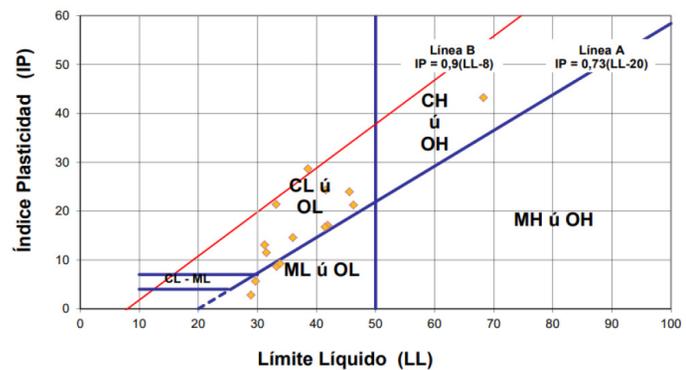
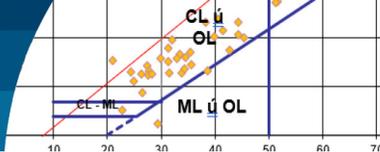


Figura 5: Carta de plasticidad de las muestras de Miranda

Ensayo de presión de expansión

Aunque se consideraron diversos criterios para identificar el potencial de expansión PE, finalmente se seleccionaron los rangos de valores de PE basados en IP propuesto por Chen (1988). Para la aplicación del ensayo de presión de expansión se seleccionaron en el estado Falcón doce muestras (Tabla 3). La muestra MoMi-11 ejerce la mayor PE (1103 kPa), lo cual según el criterio de Chen (1988),



corresponde a un PE muy alto. La mínima PE registrada para Falcón es de 64 kPa (muestra MoMi-19). En general, las muestras seleccionadas ejercen en promedio una presión de expansión de 380 kPa. En la Tabla 3 se anotan los resultados obtenidos para el estado Anzoátegui. La muestra BaCa-36 es la que ejerce mayor PE, con un valor de 909 kPa. La mínima presión de expansión para las muestras de este estado es de 15 kPa (muestra BaCa-06). Las muestras seleccionadas de Anzoátegui tienen en promedio una presión de expansión de 300 kPa. En el estado Miranda, la muestra ChO-04 ejerce la mayor PE con un valor de 188 kPa, mientras que la mínima PE registrada en ese estado es de 10 kPa (muestra ChO-09). En promedio la presión de expansión de 61 kPa en Miranda es baja e inferior al de las otras regiones estudiadas.

Ensayo de expansión libre

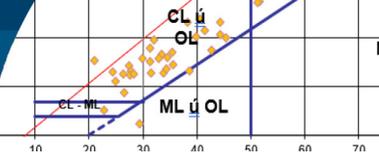
En la Tabla 3 se presentan los resultados para el ensayo de expansión libre para el estado Falcón. Se observa que la muestra que ejerce el mayor porcentaje de expansión libre EL es la muestra MoMi-11 con un aumento de volumen alto de 35.9%, mientras que la mínima EL es de 8.2% (muestra MoMi-23). En general, las muestras seleccionadas de Falcón presentan un promedio de EL de 19%, considerado por Das (2012) como muy alto. La muestra que ejerce mayor EL para el estado Anzoátegui es la BaCa-13 con 22.7% y la mínima EL registrada para este estado es de 4.2% (BaCa-40). Las muestras seleccionadas presentan un promedio de EL de 14%, considerado como alto. Los resultados obtenidos en el ensayo de EL para el estado Miranda presentan un aumento de volumen alto de 19.8% para la muestra ChSt-06, mientras que la mínima EL registrada para las muestras de este estado es de 5.8% (muestra ChSt-03). En Miranda la EL presenta un promedio de 12% (Tabla 3), el mismo es considerado como medio-alto.

Discusión

El comportamiento característico de los suelos expansivos provocando hinchazón y contracción al estar en contacto con el agua puede causar los siguientes problemas en estructuras o proyectos de construcción: daños a estructuras ligeras como aceras y calzadas, levantamiento de edificios, daños a sótanos y asentamientos de edificios, grietas en paredes y techos, daños en tuberías y otros servicios

Tabla 3: Valores del Índice de Plasticidad IP, presión de expansión y de expansión libre en los suelos. MoMi y BaCa corresponden a muestras de Falcón y Anzoátegui, respectivamente y ChO y ChSt a muestras de Miranda

Muestra	IP, %	Presión de expansión, kPa	Expansión libre, %
MoMi-03	22.65	75	8.9
MoMi-07	38.74	789	18.9
MoMi-09	44.20	376	24.5
MoMi-10	50.66	540	25.7
MoMi-11	49.44	1103	35.9
MoMi-13	33.26	370	13.5
MoMi-14	24.65	176	-
MoMi-15	49.07	907	15.3
MoMi-16	43.24	101	-
MoMi-19	12.83	64	-
MoMi-22	16.81	76	-
MoMi-23	19.30	75	8.2
BaCa-02	11.09	88	-
BaCa-06	15.46	15	-
BaCa-09	23.24	88	-
BaCa-13	32.87	279	22.7
BaCa-17	14.52	252	13.2
BaCa-19	19.58	175	-
BaCa-22	23.19	777	14.0
BaCa-25	27.35	561	-
BaCa-29	32.21	51	5.9
BaCa-30	12.37	30	-
BaCa-34	48.12	580	17.3
BaCa-35	30.29	278	15.5
BaCa-36	48.14	909	11.4
BaCa-38	34.53	402	17.3
BaCa-40	12.61	63	4.2
ChO-02	23.97	51	7.0
ChO-04	24.34	188	16.7
ChO-05	9.27	25	-
ChO-08	13.10	13	-
ChO-09	5.65	10	-
ChSt-01	17.10	35	-
ChSt-02	14.59	35	-
ChSt-03	28.68	80	5.8
ChSt-06	43.25	102	19.8
ChSt-07	21.39	76	-



públicos (Patel, 2019). También puede ocurrir movimiento lateral de cimentaciones y muros de contención debido a la presión ejercida sobre las paredes verticales y, pérdida de resistencia al cizallamiento residual causando inestabilidad de taludes. La información acá generada señala la presencia de arcillas expansivas a lo largo de las diferentes zonas de estudio ubicadas en el norte de Venezuela lo que les confieren patologías como las arriba descritas (Patel, 2019).

La granulometría típica de todos los suelos analizados es principalmente fina (limos y arcillas), en el estado Anzoátegui el promedio de tamaño de granos finos es de 86%, mientras que en Falcón y Miranda son un poco menores, 82% y 67% respectivamente.

En la Tabla 4 se presenta una compilación resumida de datos de la literatura para diferentes sitios del mundo sobre los límites de consistencia de Atterberg y de IP. Los valores de las arcillas expansivas aquí estudiados fueron, en general, comparables con la información de la literatura para suelos expansivos (Codevilla, 2008; Deng *et al.*, 2017; Zolfaghari *et al.*, 2015). No obstante, llama la atención la escasa data en suelos tropicales. Como referencia a este punto, la extensa información presentada por Keller y Dexter (2012) donde se incluyen data de LL y LP para 78 suelos superficiales de diferentes continentes, solo contempla información para la zona templada de América del Norte, Europa y Australia.

Tabla 4: Datos sobre los límites de Atterberg y de IP para diferentes sitios del mundo

LL (%)	LP (%)	IP	Sitio	Referencia
55-83	21-38	12-18	Argentina	Codevilla (2008)
62.68	28.34	26.75	China	Deng <i>et al.</i> (2017)
32-110	12-66	8-79	Arabia Saudita	Sabtan <i>et al.</i> (2005)
23.7-92.0	13.7-54.0	28.0	Múltiples Sitios	Keller y Dexter (2012)
40.3-62.1	3.5-49.1	0.8-42.3	Irán	Zolfaghari <i>et al.</i> (2015)
20.9-78.9	5.5-35.1	2.5-50.7	Venezuela	Este trabajo

En este trabajo, el estado Miranda fue el que presentó el mayor número de suelos con valores de LL altos (superior a 50). En general, IP de las arcillas expansivas del norte de Venezuela es alto, con un promedio global de 22.85, siendo la región del estado Falcón la que presentó un promedio

moderado (17.49). El límite de contracción promedio de las arcillas del norte de Venezuela es alto (24.51), superior al presentado por Zolfaghari *et al.* (2015) para suelos limosos (12.0) de Irán, para un suelo arenoso bien gradado (5.24) de las sabanas de Monagas, Venezuela, y en suelos expansivos (12-18) del Gran Buenos Aires, Argentina (Codevilla, 2012).

Por otro lado, los valores de los índices de friabilidad (IF) y de contracción (IC) de las arcillas del norte de Venezuela presentaron un valor promedio de 3.76 y 19.01, respectivamente. El promedio de IF de estas arcillas es muy inferior a los anotados por Zolfaghari *et al.* (2015) para suelos de Irán (16.4-20.2) y para un suelo de sabana de Venezuela. Igualmente, el valor promedio del IC resultó inferior al presentado por Zolfaghari *et al.* (2015) para suelos de Irán (37.1-40.9).

Relaciones entre la presión de expansión y la expansión libre con IP

La correlación entre la presión de expansión e IP para las tres regiones estudiadas se presentan en la Tabla 5, en todos los casos se encontró una alta correlación entre ambos parámetros. Estos resultados corroboran que el criterio usado para evaluar el Potencial de Expansión PE de un suelo arcilloso basado en IP (Chen, 1988), criterio bastante adecuado por lo preciso y fácil de medir que es IP. Por lo tanto, se considera apropiado para ser usado en el estudio e identificación del comportamiento expansivo de estos tipos de suelos.

Tabla 5: Análisis de correlación entre la presión de expansión e IP para las tres regiones estudiadas. * y **** significativos $p \leq 0.01$ y 0.005 , respectivamente**

Anzoátegui	Falcón	Miranda	Todas las muestras
0.680****	0.761****	0.631***	0.601****

El ensayo de expansión libre fue realizado para un universo menor de muestras, por lo que las relaciones entre expansión libre y presión de expansión y con IP se presentan para el global de muestras, y no por regiones (Tabla 6). La expansión libre mostró una fuerte asociación tanto con el IP como con la presión de expansión, con un valor de significación entre IP y EL (0.653****) muy parecido al encontrado para el caso de la relación entre IP y PE (0.601****, Tabla 5).

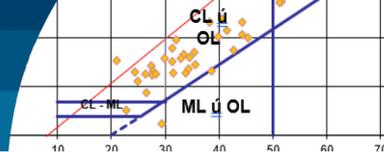


Tabla 6: Análisis de correlación entre la expansión libre EL con IP y la presión de expansión PE para las tres regiones estudiadas *** y **** significativos $p \leq 0.01$ y 0.005 , respectivamente

Parámetro	IP	PE
EL	0.653****	0.585***

Relaciones entre los límites de Atterberg

Cuando se relacionan los valores de los diferentes límites Atterberg entre sí, se encontraron muy altas correlaciones entre LL con LP, LC e IP (Tabla 7). Destaca, como es de esperar, la fuerte asociación entre el LL e IP, esta relación, como se conoce, constituye el andamiaje para la construcción de las cartas de plasticidad de Casagrande. El LP se relaciona también, aunque con más baja probabilidad, con el índice de contracción y con IP (Tabla 7), finalmente, entre LC e IP se encontró igualmente una fuerte asociación.

Tabla 7: Análisis de correlación entre los diferentes límites de Atterberg para todos los suelos

	LL	LP	LC	IP
LL	-	0.643****	0.497****	0.936****
LP	0.643****	-	0.381****	0.334****
LC	0.497****	0.381****	-	0.437****

Conclusiones

Los suelos expansivos del norte de Venezuela (SENV) presentan, en general, una granulometría fina compuesta de limos y arcillas. Para las arcillas expansivas AE de los estados Anzoátegui y Falcón se encontraron contenidos promedio de partículas finas muy similares, de 86% (Anzoátegui) y 82% (Falcón), mientras que los suelos del estado Miranda las AE son más heterogéneas que los de las otras dos zonas, con contenidos en gravas y arenas mucho mayores y, en consecuencia, con contenidos de partículas finas menor (67%). Aunque muchas de las muestras presentaron altos valores de índice de plasticidad IP (por encima de los 30), el promedio para el total de muestras analizadas fue de 22.85 por lo que los SENV se caracterizan por presentar un IP mediano a alto.

Un estudio más detallado en base a la carta de plasticidad permite concluir que las muestras tomadas en el estado Falcón son en general muy plásticas, mayoritariamente arcillas de alta plasticidad (CH). Mientras que en el estado Anzoátegui, se observa: un grupo mayoritario ubicado en

el área de arcillas de baja plasticidad (CL) y otro grupo menos significativo en el área de arcillas de alta plasticidad (CH). Por otro lado, para Miranda, se observa un grupo claramente mayoritario ubicado en el área de arcillas de baja plasticidad (CL), otro grupo menos significativo en el área de limos de baja plasticidad (ML), por lo que son principalmente arcillas de baja plasticidad (CL).

Todas las carreteras estudiadas presentan arcillas expansivas, el valor más alto de potencial de expansión registrado fue 1103 kPa para Falcón, 909 kPa para Anzoátegui, mientras que el máximo de presión de expansión en Miranda fue mucho más bajo (188 kPa), aunque todavía catalogado como correspondiente a un suelo expansivo.

La correlación de la presión de expansión PE e IP indica una alta asociación entre ambos parámetros. Estos resultados corroboran que el criterio usado para evaluar el potencial de expansión de un suelo arcilloso basado en el IP propuesto por Chen (1988) es bastante adecuado, por lo tanto, se recomiendan los valores del IP como criterio en el estudio e identificación del comportamiento expansivo de estos suelos. Las correlaciones de los valores de los límites Atterberg entre sí señalan muy altas asociaciones entre LL con LP, LC e IP. Destaca, como esperado, la fuerte asociación entre el límite líquido y el índice de plasticidad, esta relación, constituye el andamiaje para la construcción de las cartas de plasticidad de Casagrande. El límite plástico se relaciona bien con en el índice de contracción y con el índice de plasticidad, finalmente, entre LC e IP se encontró igualmente una fuerte asociación.

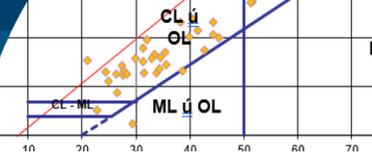
Referencias

ASTM D6913 (2017). Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. West Conshohocken PA, USA

ASTM D2216 (2019). Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. West Conshohocken PA, USA

ASTM D4318 (2017). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. West Conshohocken PA, USA

ASTM D427 (2004). Test method for shrinkage factors of soils by the mercury method. West Conshohocken PA, USA



- ASTMD4546 (2021). Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of cohesive soils. West Conshohocken PA, USA
- Chen, F. (1988). *Foundations on expansive soils*. Elsevier Scientific Publishing Company, USA
- Codevilla, M. (2008). Arcillas expansivas del Gran Buenos Aires. *XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina
- Das, B. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Editorial Cengage Learning, 7ma edición, México
- Deng, Y., Cai, C., Xia, D., Ding, S., Chen, J. and Wang, T. (2017). Soil Atterberg limits of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China. *Solid Earth* 8(2), 499–513
- Kalantari, B. (2012). *Foundations on expansive soils: a review*. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(18), 3231-3237
- Keller, T., and Dexter, A.R. (2012). Plastic limits of agricultural soils as functions of soil texture and organic matter content. *Soil Research* 50(1), 7–17
- López, C.I. y Guevara, E.J. (2012). *Determination and evaluation of expansive and dispersive clays in three locations in northern Venezuela, Anzoátegui, Falcón and Miranda states*. Proyecto de título de Ingeniero Geólogo, Universidad Central de Venezuela
- López-Hernández, D. (2019). *Sabanas del Orinoco: Producción primaria y biogeoquímica de los elementos*. Colección de Estudios Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. Caracas, Venezuela
- López-Hernández, D., Mahia-Masip, M.A., Meléndez, W. and López-Contreras, A. (2022). NH_4^+ fixation and ionic competition with K^+ in a clayey soil from Ocumare Del Tuy, Venezuela. *Canadian Journal of Agriculture and Crops* 7(2), 38-45
- Ng, C.W.W. and Menzies, B. (2007). *Advanced unsaturated soil mechanics and engineering*. Taylor & Francis Group, Abingdon, UK
- Patel, A. (2019). *Geotechnical investigations and improvement of ground conditions*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, UK, 167-191
- Prieto, N. y López-Hernández, D. (1984). Estudios físicos y químicos de suelos en la región del Estero de Camaguán (Edo. Guárico). *Boletín de la Sociedad Venezolana de Ciencias Naturales* 39, 215-226
- Rao, A.S., Phanikumar, B.R. and Sharma, R.S. (2004). Prediction of swelling characteristics of remoulded and compacted expansive soils using free swell index. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 37(3), 217–226
- Rodríguez, P.C.A. (2020). Un método simplificado de predicción de hinchamiento de arcillas expansivas debido a cambios de humedad. *Obras y Proyectos* 28, 35-44
- Rodríguez Castiblanco, E.A. (2014). *Evaluación del comportamiento geomecánico de arcillas en el sector de Campoalegre-Ciudad de Barranquilla*. Tesis de Magister en Ingeniería-Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Sabtan, A.A. (2005). Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences* 25(5), 747–757
- Seed, H.B., Woodward, R.J. and Lundgren, R. (1962). *Prediction of swelling potential for compacted clays*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 88(3), 53-87
- Shi, B., Jiang, H., Liu, Z. and Fang, H.Y. (2002). Engineering geological characteristics of expansive soils in China. *Engineering Geology* 67, 63-71
- Vorwerk, S., Cameron, D. and Keppel, G. (2015). Clay soil in suburban environments: Movement and stabilization through vegetation. Part 3, chapter 22 in *Ground Improvement Case Histories*, B. Indraratna, J. Chu, and C. Rujikiatkamjorn (eds.), Butterworth-Heinemann, 655–682
- Zolfaghari, Z., Mosaddeghi, M.R., Ayoubi, S. and Kelishadi, H. (2015). Soil Atterberg limits and consistency indices as influenced by land use and slope position in Western Iran. *Journal of Mountain Science* 12(6), 1471-1483
- Zumraw, M. (2013). Swelling potential of compacted expansive soils. *International Journal of Engineering Research & Technology* 2(3), 1-6