



Artificio

Revista en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos
Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.
Núm. 10 (2026) periodo julio - diciembre

e-ISSN
2992-7463
Site

[https://revistas.uaq.mx/
index.php/artificio](https://revistas.uaq.mx/index.php/artificio)



Análisis de comparativo de costos de la técnica sustentable de mejoramiento de suelos expansivos comparada con métodos tradicionales.

Comparative cost analysis of the sustainable technique for improving expansive soils compared to traditional methods.

Marcela Miranda Rodríguez

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
ORCID: 0009-0009-8782-5921
mmiranda25@alumnos.uaq.mx

Teresa López Lara

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
ORCID: 000-0001-7289-7919
lolte@uaq.mx

Juan Bosco Hernández Zaragoza

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
ORCID: 000-002-3680-7573
bosco@uaq.edu.mx

Armando Miranda Nájera

Centro de Bachillerato Tecnológico
Agropecuario No. 40
Área de Matemáticas
ORCID: 000-005-4328-2938
armandomiranda40@dgetaycm.sems.gob.mx

Received: 2025-09-08

Accepted: 2025-12-12

Cómo citar este trabajo. How to cite this paper.

Miranda Rodríguez, M., López Lara, T., Hernández Zaragoza, J. B., Miranda Nájera, A. (2026). Análisis de comparativo de costos de la técnica sustentable de mejoramiento de suelos expansivos comparada con métodos tradicionales. *Artificio* (10), eArt.1001, 1-15.

Análisis de comparativo de costos de la técnica sustentable de mejoramiento de suelos expansivos comparada con métodos tradicionales.

Marcela Miranda Rodríguez · Teresa López Lara ·
Juan Bosco Hernández Zaragoza · Armando Miranda Nájera

Resumen

El rápido crecimiento de la zona Metropolitana de Querétaro genera una demanda de vivienda constante. Esta situación conlleva una serie de problemáticas, entre ellas el uso de suelos no aptos para la construcción; en específico arcillas expansivas. La construcción sobre este tipo de suelos genera una serie de diversas afectaciones a la estructura de las viviendas como: agrietamientos en paredes y pisos, cambio en el nivel del suelo, daños en los marcos de puertas y ventanas, etc. Estos diversos daños son ocasionados debido al cambio de volumen del suelo en presencia o ausencia de humedad. Los métodos utilizados en la construcción para el abatimiento de la expansión son principalmente dos, ambos incluyen el movimiento de tierras, por lo que el costo es elevado y por ende se encarece el costo final de la vivienda. A su vez al ser construcciones ligeras, estas no generan un peso suficiente para contrarrestar la fuerza de empuje ejercida por el suelo. La implementación de una técnica sustentable de mejoramiento de suelos expansivos que consiste en la extracción de un volumen de suelo, mediante su perforación ha permitido abatir un 85% de la expansión, y además de la eficiencia del método, este genera un ahorro económico del 90.77% respecto a la técnica que consiste en la sustitución de material arcilloso por un material inerte, en este caso tepetate, también con respecto a este método se tiene un ahorro del 8.57% del tiempo empleado en el mejoramiento de suelo. Con respecto a la técnica de mejoramiento de suelo con cal al 7% se tiene un ahorro económico de 92.13%, además de tener un ahorro de tiempo de 76.12%.

Palabras clave: *suelos expansivos, análisis de costos, perforación, estabilización química, técnica sustentable.*

Abstract

The rapid growth of the Querétaro Metropolitan Area generates a constant demand for housing. This situation leads to a series of problems, including the use of unsuitable soils for construction, specifically expansive clays. Building on this type of soil causes various structural problems such as cracks in walls and floors, changes in ground level, and damage to door and window frames. These various damages are caused by changes in soil volume in the presence or absence of moisture. There are two main construction methods used to mitigate soil expansion, both of which involve earthmoving, resulting in high costs and, consequently, a higher final cost for the home. Furthermore, because these structures are lightweight, they do not generate enough weight to counteract the thrust exerted by the soil. The implementation of a sustainable technique for improving expansive soils, which involves extracting a volume of soil through drilling, has reduced expansion by 85%. In addition to its efficiency, this method generates cost savings of 90.77% compared to the technique of replacing clay material with an inert material, in this case, tepetate (a type of volcanic soil). It also saves 8.57% of the time required for soil improvement. Compared to the soil improvement technique using 7% lime, the result is a cost savings of 92.13% and a time savings of 76.12%.

Keywords: *expansive soils, cost analysis, drilling, chemical stabilization, sustainable technique.*

INTRODUCCIÓN

Las arcillas se generan a partir de los minerales que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas (principalmente silicatos); sin embargo, al estar expuestas a agentes de descomposición química, se logra la formación de arcillas (Juárez B, 2005). Los suelos expansivos representan un desafío significativo en la ingeniería civil, particularmente en los desplantes de cimentaciones o terraplenes de las construcciones debido a que el suelo es susceptible a experimentar cambios volumétricos (Hernández et al., 2009).

Estos cambios, que ocurren principalmente por las variaciones en el contenido de humedad del suelo debido a las precipitaciones generadas por las temporadas de lluvia, fugas en las redes de la propia vivienda o simplemente saturación por escurrimiento generan presiones diferenciales que afectan la estabilidad e integridad de las estructuras. La cantidad de arcilla puede variar, alcanzando el 90% en depósitos piroclásticos. Además, tienen cambios en el volumen con la variación en el contenido de humedad y evidencias del movimiento del suelo mediante el deslizamiento de sus caras (IUSS, 2007).

El cambio en la humedad del ambiente favorece la formación de la arcilla expansiva (montmorillonita) debido a la escasa lixiviación. Se reportan en países como México, Estados Unidos, Sudáfrica, España e India (Zapata, 2018). La distribución geográfica de las arcillas en el estado de Querétaro se encuentra en los municipios de Santiago de Querétaro, Pedro Escobedo, Corregidora, Huimilpan y San Juan del Río. En menor medida también existe este tipo de suelo en los municipios de Tequisquiapan, Ezequiel Montes, Cadereyta de Montes, y Colón, sin embargo, la mayor parte del territorio de Zona Metropolitana de Querétaro se encuentra sobre vertisoles (INEGI, 2020).

Las consecuencias de estos movimientos son severas, generando una serie de daños importantes en la estructura de las viviendas como agrietamientos en los muros, deformaciones en losas y problemas en elementos de soporte. Según estudios, los daños ocasionados por suelos expansivos son equiparables en magnitud con los daños causados por distintos agentes naturales de gran impacto como: huracanes, inundaciones, lluvias extremas, temblores, entre otros (López et al. 2005), que de acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) ascendió

a los 31 millones 862 mil pesos mexicanos (MXN) en 2020. En el sector de la construcción a lo largo de la historia se han desarrollado una serie de técnicas para abatir la expansión de suelos arcillosos, entre los cuales se encuentran: estructuras pesadas, pre-carga o sobrecarga, compactación dinámica, estabilización mecánica con geosintéticos, estabilización química y sustitución de suelo. Los últimos dos son los principales procedimientos utilizados en la industria de la construcción para el mejoramiento de suelos expansivos. De manera más específica la sustitución del suelo pretende remplazar el volumen de suelo de interés por otro tipo de suelo, usualmente tepetate (Hernández et al. 2009). El otro método que también es comúnmente utilizado consiste en la extracción del de suelo que se requiere mejorar y mezclarlo con un porcentaje de cal que va del 2% hasta el 7% del volumen de suelo a mejorar (Guerrero et al., 2002). En el primer caso el objetivo es sustituir por completo el suelo problemático, y en el segundo la cal genera un aumento importante en el índice de plasticidad obteniendo una arcilla de baja compresibilidad con una expansión menor. Recientemente se estudia una técnica de mejoramiento de las propiedades de suelo sin modificar su estructura física y química. Esta técnica consiste en realizar una serie de perforaciones cilíndricas de un diámetro de 10 cm con una profundidad de 2 metros, lo que representa un 1.57% de extracción, lo que genera que la expansión del suelo sea abatida en un 85% (Meza et al., 2017). Este método al no requerir la remoción total del suelo ni la adición de materiales externos como la cal, la convierte en una alternativa prometedora y viable para los sistemas de mejoramiento de suelos, con lo que se logra demostrar que dicho método puede llegar a ser un nuevo sistema de cimentación mediante losa, sin necesidad de desechar el suelo existente (Bimbela et al., 2014).

El estudio se enfocó en analizar tres métodos de mejoramiento de suelos arcillosos expansivos en la Zona Metropolitana de Querétaro, que es una región con una demanda de vivienda constante. Los métodos analizados fueron: la sustitución del suelo arcilloso por tepetate, la estabilización química del suelo con un 7% de cal, y una nueva técnica sustentable que consiste en la perforación del suelo. El análisis se realizó considerando un volumen de suelo de 8 m³ para comparar los costos y tiempos de ejecución de cada uno. Los resultados más relevantes mostraron que la técnica

de perforación cilíndrica (extracción del 1.57% del volumen del suelo mediante 8 perforaciones) es la opción más eficiente y económica. Esta técnica resultó ser un 90.77% más económica y un 8.57% más rápida que la sustitución con tepetate, y ofreció un ahorro económico aún mayor del 92.13% y una reducción de tiempo del 76.12% en comparación con la estabilización con cal al 7%. Estos resultados son altamente relevantes para la construcción de viviendas de interés social, ya que la técnica de perforación minimiza los costos y el tiempo de ejecución, factores críticos en este tipo de proyectos. Además, al ser un proceso sencillo que no requiere mano de obra especializada y que utiliza el suelo existente, se alinea con prácticas de construcción sostenible, lo que permite a los

desarrolladores ofrecer viviendas estables y duraderas sin un incremento significativo en los costos.

DESARROLLO

Metodología

En el siguiente estudio se realizó el análisis de tres métodos constructivos para lograr abatir la expansión de un suelo arcilloso, dos de ellos comúnmente utilizados y uno de ellos es una nueva técnica que se encuentra en fase de estudio. En los tres casos se consideró el análisis de mejoramiento para un volumen de suelo de 8 m^3 ($2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) como se muestra en la Figura 1.

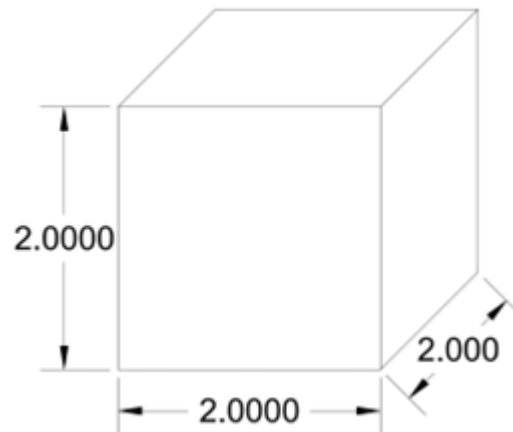


Figura 1. Volumen de suelo a analizar.

Procedimiento: Sustitución de material

Proceso constructivo

Este procedimiento consistió en la excavación del volumen de suelo a sustituir, este material necesariamente fue retirado del sitio, ya que se consideró como desperdicio. Posteriormente, se colocó el material de banco (tepetate) en capas de 20 cm de alto, cada capa

fue compactada de manera manual utilizando maquinaria, en este caso se consideró el uso de un compactador de impacto, comúnmente conocido en México como “bailarina”. Hasta que se logró una compactación correcta fue necesario humedecer el material hasta que se encontró con su humedad óptima y así alcanzó el 90% de su peso volumétrico máximo seco (PVMS) como se muestra en la Figura 2.

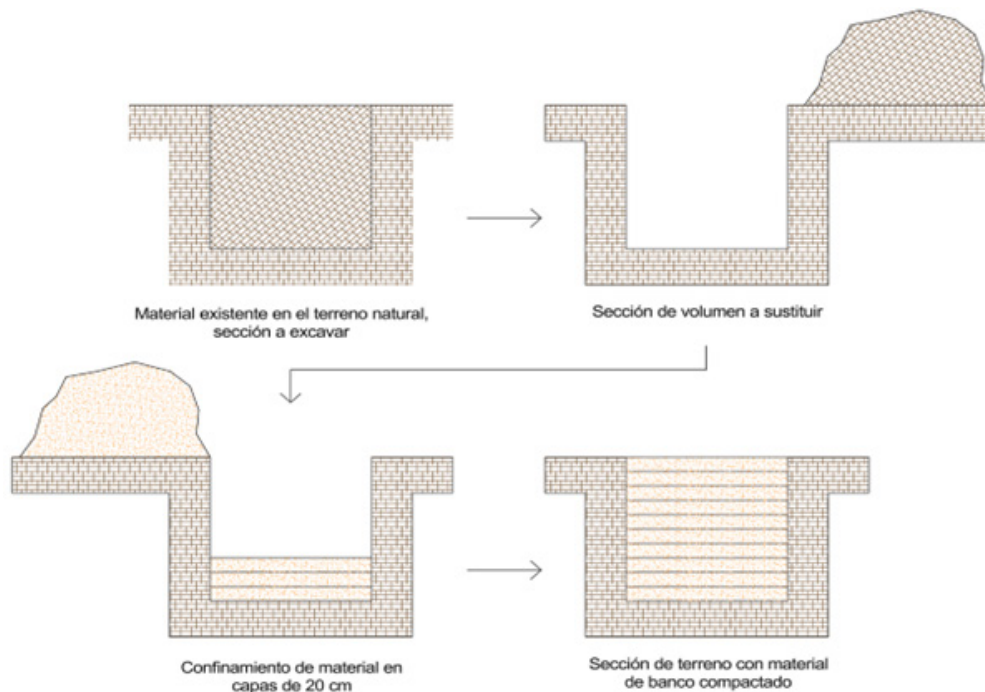


Figura 2. Procedimiento de sustitución de material.

Material

El material por utilizar fue tepetate; un material de banco compactable inerte a los cambios de humedad, el cual sufre de cementación al perder humedad. La cantidad necesaria de material fue 10.92 m^3 debido al factor de abundamiento de este. También fue necesario el uso de agua, ya que se requirió humedecer el material para lograr que este llegara al 90% de su Peso volumétrico máximo del suelo (PVSM). En este caso se consideraron 1.6 m^3 .

Mano de obra

Con respecto a la mano de obra fue necesario considerar; un ayudante general y dos operadores de maquinaria, el ayudante general se encargó del acomodo y compactación del material, y en el caso de los operadores; uno para el manejo de la retroexcavadora la cual se encargó de los trabajos de excavación y carga de material en el camión de volteo, para lo que fue necesario también un segundo operador.

Equipo y herramienta

El equipo que se consideró para este procedimiento consiste en: una Retroexcavadora marca "Yumbo", modelo 630 L (antes Y-90) sobre orugas, con motor diésel "International" D358 de 103 H.P., compactador de impacto (bailarina), marca Bosch, modelo 18-942, con motor de 4.2 H.P. para mezcla de aceite gasolina 1:25, camión de volteo Ford S-1834 de 7.00 m^3 y 13.00 toneladas con motor diésel Perkins de 132 H.P., llantas 1000-20 para ciudad y carretera [6]. Este último se consideró su uso en dos situaciones, durante su estado activo, es decir cuando realizó el traslado, y su estado inactivo, mientras fue cargado con el material.

Duración

De acuerdo con el rendimiento de la mano de obra establecido en el Catálogo de conceptos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), un ayudante requiere de .105 jornadas para el relleno en cepas o mesetas con material de banco de un metro cúbico, por ende, para realizar los 8 m^3 planteados fueron necesarias 6 horas con 45 minutos, además tomando en cuenta que la excavación inicial del material requirió 2 horas. Por ende se puede confirmar

que el trabajo en total llevó en total 8 horas con 45 minutos. Lo que equivale a 1.05 jornadas.

Procedimiento: Estabilización de material

Proceso constructivo

Este procedimiento consistió en la excavación del volumen de suelo a mejorar, sin embargo, en este caso el material fue combinado con cal, la proporción que se utilizará fue del 7% en peso al suelo seco. La cal se mezcló con el suelo in situ con el uso de maquinaria, en este caso se consideró una motoconformadora y

un camión pipa, el primero fue para realizar la mezcla de material y el segundo para proveer a la mezcla posteriormente de la humedad óptima para lograr su compactación adecuada, este material es necesario permanezca en reposo de 24 a 72 horas, para posteriormente, ser colocado en capas de 20 cm de alto, cada capa fue compactada de manera manual utilizando maquinaria, en este caso se considera el uso de un compactador de impacto (bailarina). Es necesario humedecer el material hasta lograr su humedad óptima y así alcanzar el 90% de su peso volumétrico máximo seco como se muestra en la Figura 3.

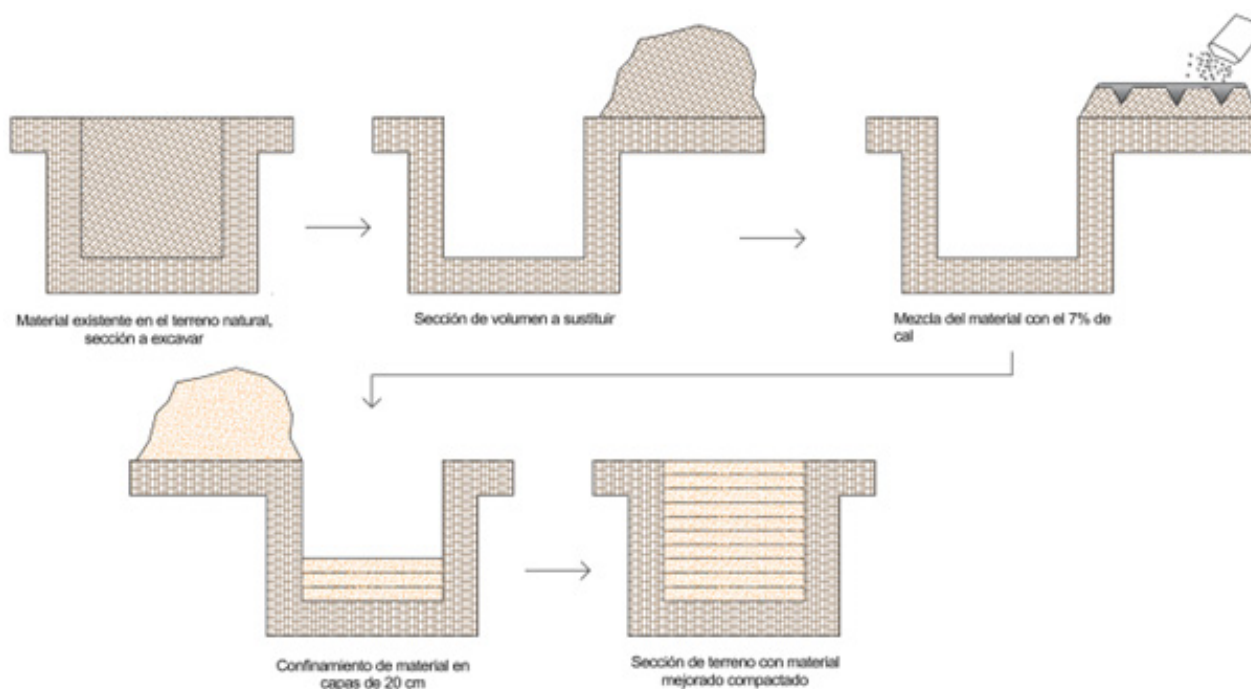


Figura 3. Procedimiento de mejoramiento de suelo mediante el uso de cal al 7%.

Material

El material por utilizar fue tepetate; un material de banco compactable inerte a los cambios de humedad, sufre de cementación al perder humedad. La cantidad necesaria fue 10.92 m³ debido al factor de abundamiento. También es necesario el uso de agua, ya que es necesario humedecer el material para lograr que este llegue al 90% de su peso volumétrico máximo del suelo (PVSM). En este caso se consideran 1.6 m³.

Mano de obra

Con respecto a la mano de obra fue necesario considerar; un ayudante general que se encargó de la dispersión de la cal sobre el material a mejorar y un operador de maquinaria para el uso de la motoconformadora, el cual tuvo por objetivo de realizar una mezcla homogénea para que la reacción química se llevara a cabo con éxito.

Equipo y herramienta

El equipo que se consideró para este procedimiento consiste en: una Motoconformadora compac motor diésel dina cummins v6-378c de 140 H.P., compactador de impacto (bailarina) marca Bosch, modelo 18-942, con motor de 4.2 H.P. para mezcla de aceite gasolina 1:25 y un camión pipa de 8 m³, con chasis Famsa diésel perkins 132 h. p. (CMIC, 2025).

Duración

De acuerdo con el rendimiento de la mano de obra establecido en el Catálogo de conceptos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), un ayudante requirió de .93 jornadas para el esparcimiento de la cal, el trabajo de la maquinaria requirió de 1.92 horas para su mezcla, posteriormente se necesitaron 24 horas de reposo, Para finalizar fueron necesarias .84 jornadas. Lo que equivale a 1 día, 9 horas y 30 minutos.

Procedimiento: Perforación de suelos

Proceso constructivo

El proceso de perforación se realizó con el uso de una motoperforadora manual de tipo “ahoyadora”

que requirió el uso de gasolina, esta maquinaria no necesitó de un operador especializado y debido a las propiedades del suelo, no fue necesaria maquinaria de mayor potencia. La primera fase de perforación consistió en la perforación con una broca de 1 metro de largo, al llegar a la profundidad límite, se colocó una extensión de 1 metro para lograr alcanzar la profundidad requerida, la disposición de las perforaciones se propuso uniforme con el fin de que no se encuentren muy cercanas entre sí. Este procedimiento consistió en la excavación de cilindros de suelos con el fin de extraer el 1.57% del volumen de suelo. Tomando en cuenta que los cilindros extraídos son de 10 cm de diámetro y 2 metros de profundidad como se muestra en la Figura 4. La cantidad de cilindros perforados se expresa en 1.

$$\text{Volúmen de suelo}=2m \times 2m \times 2m=8m^3$$

$$\text{Volúmen de suelo extraído}=8 \times .0157=.125 \text{ m}^3$$

$$\text{Cilindro de extracción}=\pi r^2 h=\pi (.05)^2 (2)=.0156 \text{ m}^3$$

$$\text{Cant. de cilindros perforados}=.126/.0156=8.07 \approx 8 \text{ perforaciones}$$

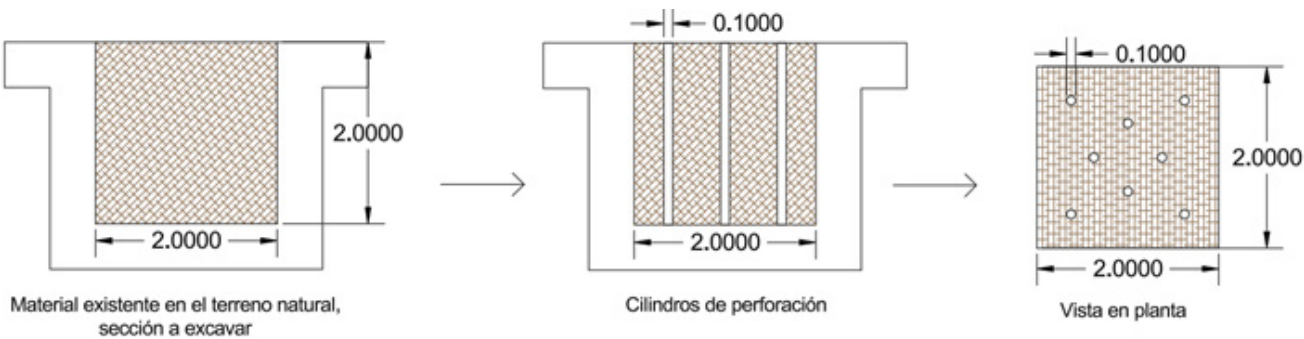


Figura 4. Procedimiento de mejoramiento de suelo mediante perforaciones verticales.

Material

Debido a que no se modificó la estructura física ni química del suelo no fue necesario el uso de ningún material para la mezcla o sustitución.

Mano de obra

Se consideró un ayudante general, el cual se encargó del manejo de la motoperforadora mecánica.

Equipo y herramienta

La herramienta que se utilizó fue una motoperforadora manual de tipo “ahoyadora” a gasolina 52cc, Truper con un Barreno Echo E-99944900170 de 100 cm y una extensión de 100 cm para lograr la profundidad requerida.

Duración

Debido a que se utilizó una maquinaria menor y de acuerdo con la cantidad de perforaciones no se requirió un mayor número de elementos, el costo horario de la maquinaria contempló la mano de obra y por ello tenemos que fue necesario un trabajo de 8 horas,

tomando en cuenta que se requirió un descanso de 30 minutos entre hora y hora de trabajo.

RESULTADOS

A continuación, se desglosa el proceso que muestra el costo de cada uno de los tres procesos para realizar el proceso de mejoramiento de suelo en los 8m³, y con ello realizar una comparativa de costos y tiempos entre cada uno de ellos.

- Proceso de sustitución: Consistió en la excavación del material, movimiento de este, relleno y compactación con material de banco. El costo de realizar este procedimiento en el volumen de suelo especificado se muestra en la TABLA I.

Procedimiento de sustitución de suelo				
Concepto	Unidad	Cantidad	Costo (enero 2025)	Importe
Excavación por medios mecánicos en cepas, material tipo 1 en zona “A”, hasta 2.00 m de profundidad medido en banco (CMIC, 2025).	m³	8	\$38.04	\$304.32
Relleno en cepas o mesetas con material de banco (tepetate), compactado al 90% con compactador de impacto, en cepas de 0.20 m, incluye: materiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo e incorporación del agua necesaria, medido compacto (CMIC, 2025).	m³	8	\$626.62	\$5,012.96
Carga mecánica y acarreo en camión de material tipo I y II, producto de excavación a un kilómetro de distancia medido en banco (CMIC, 2025).	m³	8	\$55.30	\$442.40
			Total (pesos mexicanos)	\$5,759.68(MXN)
			Total (dólar estadounidense)	\$308.66(USD)

Tabla i. Costo del procedimiento de sustitución.

- Proceso de estabilización: Consistió en la excavación del material, mejoramiento de este con cal y tepetate, relleno y compactación con el material

mejorado. El costo de realizar este procedimiento en el volumen de suelo especificado se muestra en la TABLA II.

Procedimiento de estabilización de suelo				
Concepto	Unidad	Cantidad	Costo (enero 2025)	Importe
Excavación por medios mecánicos en cepas, material tipo 1 en zona “A”, hasta 2.00 m de profundidad medido en banco (CMIC, 2025).		8	\$38.04	\$304.32
Mejoramiento de terreno con cal al 7% (Guerrero et al., 2002) en peso escarificado y compactado en capas de .20 m con incorporación de agua razón de 150l/m³. Incluye: tiro a volteo y mezcla de material		8	\$626.62	\$5,012.96
Relleno a volteo con material producto de excavación, compactado al 90% con compactador de impacto, en capas de 0.20 m medido compacto, incluye: incorporación de agua necesaria, mano de obra, herramientas y acarreos (CMIC, 2025).		8	\$179.53	\$1,436.24
			Total (pesos mexicanos)	\$6,753.52 (MXN)
			Total (dólar estadounidense)	\$361.92 (USD)

Tabla ii. Costo del procedimiento de perforación.

- Proceso de perforación: Se realizaron 8 perforaciones mediante medios mecánicos a una profundidad de 2 metros con un diámetro de 10 cm para lograr extraer un total de 1.57% del volumen del suelo. El costo de realizar este procedimiento en
- el volumen de suelo especificado se muestra en la TABLA III donde se especifica el costo horario del uso de la maquinaria, y se contempla el trabajo del operador, en la TABLA IV donde se especifica el costo total del procedimiento.

		Valor en MXN (enero 2025)	Cargos Fijos	
Costo de la máquina	(Cm)=	\$20,841.00	Depreciación	= \$25.10
Valor de las llantas	(Pn)=	\$ -	Inversión	= \$2.72
Valor de las piezas especiales	(Pa)=	\$8,687.05	Seguros	= \$16.98
Valor de la máquina	(Vm)=	\$29,528.05	Mantenimiento	= \$7.53
Horas efectivas al año	(Hea)=	\$1,000.00		= \$52.32
Vida económica	(V)=	1.00		
Tasa de seguro	(s)=	3.00%		

% de Mantenimiento	(Ko)=	30.00%		
% de Rescate	(r)=	15.00%		
Tasa de Interés	(i)=	16%		
Vr=Vm*r	=	\$4.429.21		
Ve=V*Hea	=	\$1,000.00		
Consumos				
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Gasolina	l	1	\$22.5	\$22.5
Operación				
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
Auxiliar	jor	0.15625	\$371.46	\$58.04
			Total Costo Horario (pesos mexicanos)	\$132.86

Tabla iii. Costo horario de maquinaria motoperforadora manual de tipo “ahoyadora”.

Para realizar el análisis de perforación en el volumen de suelo, fue necesario realizar el análisis primero en un metro cúbico. Se estimó que es necesaria media

hora para lograr las perforaciones que permitan extraer el 1.57% del volumen de suelo.

Procedimiento de perforación de suelo				
Concepto	Unidad	Cantidad	Costo (Enero 2025)	Importe
Perforación de suelos sin muestreo de 10 cm de diámetro hasta 2 metros de profundidad.	m3	8	\$ 66.43	\$531.44
			Total (pesos mexicanos)	\$531.44(MXN)
			Total (dólar estadounidense)	\$28.48(USD)

Tabla iv. Costo del procedimiento 3.

Con el análisis anterior se puede tener una comparativa en tiempo y costo (Figura 5 y 6) entre los tres procesos, resultados que se exponen en la TABLA V.

Comparativa en costos y tiempos			
Procedimiento	Costo		Duración (Horas)
	(MXN)	(USD)	
Sustitución	\$5,759.68	\$308.66	8.75
Estabilización	\$6,753.52	\$361.92	33.5
Perforación	\$531.44	\$28.48	8

Tabla v. Tabla comparativa entre el procedimiento de sustitución, estabilización y perforación.

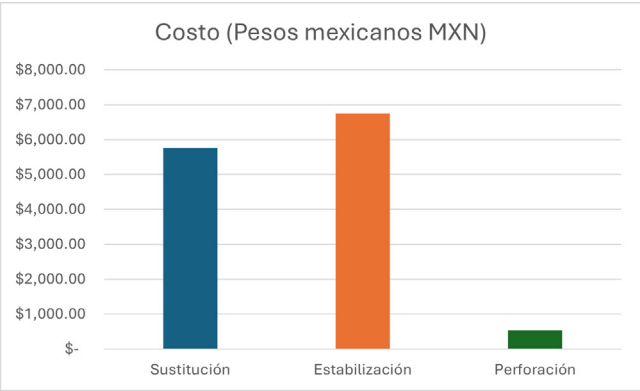


Figura 5. Comparativa económica de los procedimientos constructivos.

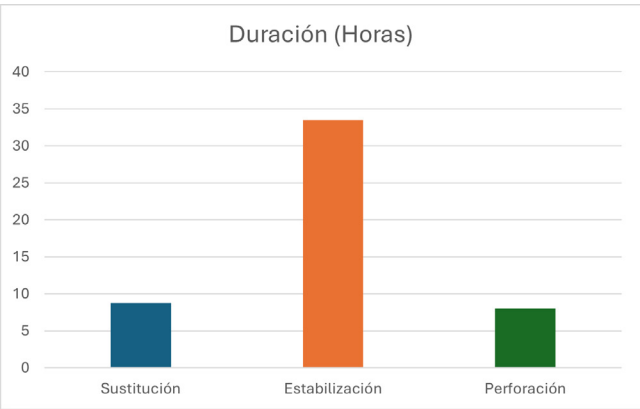


Figura 6. Comparación de los tiempos necesarios para la ejecución de los trabajos.

DISCUSIÓN

Los suelos expansivos, comunes en la Zona Metropolitana de Querétaro, representan un desafío significativo para la construcción de viviendas, especialmente en proyectos de interés social donde los recursos económicos y los plazos de ejecución son críticos. Estos suelos son susceptibles a cambios volumétricos debido a variaciones en la humedad, generan problemas estructurales como agrietamientos, asentamientos diferenciales y deformaciones en cimentaciones y terraplenes. En este sentido, la técnica de perforación cilíndrica, que consiste en la extracción de solo el 1.57% del volumen del suelo mediante ocho perforaciones, surge como una solución constructiva innovadora, eficiente y sostenible. Esta técnica no sólo aborda las problemáticas relacionadas con los suelos expansivos, sino que también ofrece amplias ventajas económicas y operativas que la hacen ideal para proyectos de vivienda social.

La construcción en suelos expansivos requiere métodos que garanticen la estabilidad estructural sin incrementar significativamente los costos. Tradicionalmente, se han empleado dos enfoques principales: la sustitución del suelo arcilloso por tepetate, un material inerte que no sufre cambios volumétricos ante la humedad, y la estabilización química mediante la incorporación de cal al 7%. Sin embargo, ambos métodos presentan limitaciones. La sustitución con tepetate implica excavar y retirar grandes volúmenes de suelo, transportarlos, disponerlos adecuadamente y reemplazarlos con material nuevo, lo que eleva los costos y alarga los tiempos de ejecución. Por su parte, la estabilización con cal requiere una mezcla homogénea y compactación correcta, procesos que demandan tiempo y, en algunos casos, mano de obra capacitada. Por su parte, la técnica de perforación cilíndrica resalta por su simplicidad y eficiencia, ya que trabaja directamente con el suelo existente, minimizando la necesidad de recursos externos.

Los análisis comparativos demuestran que la técnica de perforación es un 90.77% más económica que la sustitución con tepetate. Este ahorro se deriva de la eliminación de costos asociados a la extracción masiva, transporte y disposición del suelo original, así como de la importación de tepetate. Además, el procedimiento de perforación es un 8.57% más rápido, lo que permite optimizar los cronogramas de obra, un factor clave en proyectos de vivienda social donde los plazos

ajustados son comunes. Comparada con la estabilización con cal, la técnica de perforación ofrece un ahorro económico aún más significativo, del 92.13%, y una reducción en tiempo del 76.12%. Estos porcentajes reflejan la capacidad de la técnica para reducir tanto los costos de materiales como los tiempos de ejecución, haciendo que los recursos disponibles rindan más en contextos de presupuestos limitados.

La simplicidad del método de perforación es una de sus principales fortalezas. Al requerir solo ocho perforaciones cilíndricas, el proceso no depende de maquinaria compleja ni de mano de obra especializada, lo que facilita su implementación en proyectos de vivienda de interés social. En la Zona Metropolitana de Querétaro, donde los suelos arcillosos constituyen parte importante de la composición geológica del territorio, esta técnica permite abordar los problemas de expansión sin incrementar los costos de construcción. Además, su integración en los programas de obra es directa, ya que no son requeridas modificaciones extensas en los cronogramas ni procesos adicionales que compliquen la planificación. Esto es especialmente relevante en proyectos sociales, donde la rapidez en la entrega de viviendas es esencial para atender la constante demanda de viviendas para las familias que a diario llegan a la Zona Metropolitana de Querétaro en México.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la técnica de perforación minimiza el impacto ambiental al reducir la cantidad de suelo extraído y evitar la necesidad de importar materiales externos. Esto contrasta con las dos técnicas evaluadas, la sustitución con tepetate, que genera un impacto significativo debido a la remoción y disposición de grandes volúmenes de suelo, y con la estabilización con cal, que requiere la producción y transporte de materiales químicos. La perforación, al trabajar con el suelo in situ, promueve un enfoque más ecológico, alineándose con las tendencias actuales hacia prácticas constructivas sostenibles. En el contexto de la Zona Metropolitana de Querétaro, donde el crecimiento urbano es constante, adoptar soluciones que equilibren eficiencia, economía y sostenibilidad es fundamental para garantizar el desarrollo de viviendas seguras y asequibles.

La relevancia de esta técnica trasciende lo técnico y económico, impactando directamente en la accesibilidad de la vivienda. En proyectos de interés social, donde los márgenes presupuestarios son estrechos,

la capacidad de implementar una solución que no incremente los costos de construcción es un factor clave. La técnica de perforación permite a los desarrolladores entregar viviendas estables y duraderas sin que esto represente costos adicionales a los beneficiarios, lo que contribuye a reducir la brecha habitacional en regiones como Querétaro.

CONCLUSIONES

Es posible asegurar que la técnica sustentable de mejoramiento de suelo mediante la extracción del 1.57% de su volumen realizando 8 perforaciones ofrece ventajas significativas en términos económicos y de eficiencia en comparación con métodos tradicionales. Específicamente, esta técnica resulta ser un 90.77% más económica que el procedimiento de sustitución del volumen de suelo arcilloso con tepetate, un material conocido por su estabilidad volumétrica ante cambios de humedad, sin embargo, el proceso de extracción del suelo original, carga, transporte y posterior disposición del nuevo suelo implica un costo elevado, en contraste con la técnica de perforación, que minimiza estos costos al trabajar directamente con el suelo existente. Además, en términos de eficiencia en tiempo es 8.57% más rápido el procedimiento de perforación que el de sustitución. Por otro lado, al comparar la técnica de perforación con el método de estabilización química del suelo. En este caso el método de perforación tiene un ahorro económico del 92.13% en comparación con el método de mejoramiento de suelo con cal al 7%, además de tener un ahorro en tiempo significativamente más representativo, del 76.12%. Una solución como la planteada representa una alternativa constructiva real que permite dar solución a las diferentes problemáticas implicadas en el mejoramiento de suelos para la construcción de viviendas de interés social. Ya que, al ser una técnica con ahorros en tiempo y dinero, se puede implementar en la construcción de viviendas de interés social, donde el tiempo y dinero son factores determinantes. Además, al ser un proceso sencillo, no es necesario de mano de obra especializada y se puede fácilmente adaptar al programa de obra sin tener que hacerlo más extenso.

Referencias

Bimbela Osuna Ch. y López-Lara T. (2014). “Solución ecológica y sustentable para la disminución de expansión en arcillas mediante perforaciones” Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Querétaro; México. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/280>

Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2025). *Catálogo de costos de vivienda 2025*.

Guerrero Escamilla T. y López-Lara T. (2002). “Análisis del tiempo óptimo de reacción en la estabilización de un suelo arcillosos tratado con cal” Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Querétaro; México. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/5076>

Hernández Villares H. y López-Lara T. (2009). “Estudio del método de sustitución aplicado en arcillas expansivas en Querétaro” Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Querétaro; México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Panorama sociodemográfico de Querétaro: Censo de Población y Vivienda 2020*.

IUSS Working Group WRB. (2007). *World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007*. FAO. https://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/images/resources/pdf_documents/wrb2007_red.pdf

Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos: Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos* (3a ed.). Limusa.

López et al. (2005). “Useful Life Time and Suitable Thickness of Soil-Lime Mixture”. *Journal of Geotechnical Engineering*, EUA, ISSN 1089-3032, Vol. 10-2025, Bundle F, pp 1-7.

Meza Tapia G. y López-Lara T. (2017). “Perforación en campo: Alternativa para reducir la expansión del suelo” Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Querétaro; México. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/368>

Zapata, R. (2018). *Tipos de suelos: Caracterización de suelos arcillosos y limosos*. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Recuperado de <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/TIPOS%20DE%20SUELO.pdf>

Marcela Miranda Rodríguez

Marcela Miranda Rodríguez, Ingeniero Civil por parte de la Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes de 2017 a 2023. Cuatro años de experiencia en la construcción; tres el sector público y uno en el sector privado. Actualmente estudiante de la Maestría en Ciencias con línea terminal en Construcción en la universidad Autónoma de Querétaro con interés en las áreas de sustentabilidad en la construcción, nuevos procesos constructivos y materiales ecológicos para la construcción.



Política de acceso abierto

La Revista Artificio proporciona un acceso abierto a su contenido, basado en el principio de que ofrecer un acceso libre a las investigaciones ayuda a incrementar el intercambio global del conocimiento. Artificio no cobra ni cobrará ningún cargo a sus lectores por concepto de suscripción, ni a los autores por enviar, procesar o publicar sus artículos.

Como condición de publicación, los autores acuerdan liberar sus derechos de autor bajo una licencia compartida, específicamente la licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Esta licencia permite a cualquier persona compartir, copiar, transformar y redistribuir el material en cualquier medio o formato bajo los siguientes términos:

- *Dar crédito al autor del texto
- *No hacer uso del material con propósitos comerciales
- *Compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
- *Adaptar: remezclar, transformar y crear obras derivadas del material
- *Si se remezcla, transforma o crea obras derivadas del material, se deben distribuir las nuevas contribuciones bajo la misma licencia que la original