

# Modificación de las propiedades geotécnicas de un suelo fino debido a su contaminación con dos aguas residuales

Sinhue A. GAXIOLA GÓMEZ<sup>a</sup>, Christian E. HERNÁNDEZ-MENDOZA<sup>a,1</sup>, Eduardo ROJAS GONZÁLEZ<sup>b</sup>, Omar CHÁVEZ ALEGRÍA<sup>b</sup> y Ma. de la Luz PÉREZ REA<sup>b</sup>  
<sup>a</sup>Laboratorio de Geotecnia Ambiental, Universidad Autónoma de Querétaro – Facultad de Ingeniería, México.  
<sup>b</sup>Universidad Autónoma de Querétaro – Facultad de Ingeniería, México.

**Resumen.** El vertido de aguas residuales (AR) en el suelo representa un riesgo al ambiente ya que estas se pueden infiltrar hasta llegar al manto freático ocasionando su contaminación. Se sabe que algunos contaminantes presentes en las AR pueden interactuar con el suelo, lo cual puede modificar sus propiedades geotécnicas. El objetivo de este trabajo consistió en determinar el cambio en las propiedades geotécnicas de un suelo fino debido a su contaminación con un AR municipal y una industrial. Para esto, se extrajo una muestra de suelo natural, la cual se dividió en 2 partes, cada una de las cuales se contaminó con una concentración creciente de un solo tipo de AR (C: 0%-75%). Los resultados muestran que el suelo tendió a acidificarse conforme se incrementó la concentración del AR, siendo más notable este efecto cuando se usó AR industrial (pH=7.5 @ C=75% AR). La distribución del tamaño de granulos del suelo varió en función de la concentración y tipo de AR. Los límites de Atterberg (LL, LP, IP, CL) tienden a incrementar conforme aumenta la concentración de AR en el suelo. Lo anterior se reflejó en los cambios en la clasificación SUCS de las muestras de suelo contaminado, las cuales variaron entre CH y MH. De esta forma se concluye que la contaminación de un suelo fino con AR modifica sus propiedades geotécnicas, las cuales varían en función del tipo y concentración de AR.

**Palabras Clave.** Suelo contaminado, agua residual, geotecnia ambiental, propiedades geotécnicas.

## 1. Introducción

Todas las actividades humanas generan residuos los cuales pueden tener una variación espacial, respecto a su cantidad y composición, en función del proceso del cual surgieron. Generalmente, las operaciones de disposición final de estos residuos incluyen prácticas no sustentables y con efectos adversos para el ambiente. Tal es el caso de la disposición no controlada de las aguas residuales (AR) producidas tanto a nivel industrial como a nivel municipal.

---

<sup>1</sup> Autor para correspondencia, Laboratorio de Geotecnia Ambiental, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, División de Investigación y Posgrado. Centro Universitario, Cerro de las Campanas S/N, 76010 Querétaro, Querétaro, México; E-mail: ce\_hm@yahoo.com.mx.

Tanto el agua residual doméstica como el agua residual industrial contienen compuestos químicos, sales disueltas, materia orgánica, aceites, grasas, detergentes, metales (incluyendo metales pesados), entre otros, cuya concentración varía dependiendo de la fuente de la cual provienen [1].

A nivel mundial se han hecho muchos esfuerzos por investigar, desde el punto de vista de la Ingeniería Ambiental, los cambios que sufre el suelo bajo la acción de diversos contaminantes, tal es el caso de la contaminación del suelo por las aguas residuales generadas en diferentes fuentes y/o procesos [2 – 5]. En contraste, se cuenta con poca información sobre el efecto que tiene la contaminación del suelo sobre sus propiedades geotécnicas [6, 7].

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo consistió en determinar el cambio en las propiedades geotécnicas de un suelo fino debido a su contaminación con un AR municipal y una industrial.

## 2. Metodología

Para alcanzar el objetivo de este trabajo se dividió la metodología en tres etapas y se adaptó la metodología descrita por [8, 9]. Inicialmente se realizó un pozo a cielo abierto hasta una profundidad de 2.5 m. La muestra de suelo se transportó al laboratorio y se dividió en tres partes. Una parte se empleó para caracterizar el suelo natural y las dos partes restantes se contaminaron con un solo tipo de agua residual.

Se tomó un lote de agua residual municipal y un lote de agua industrial y se transportaron inmediatamente al laboratorio. Las características de las AR empleadas se indican en la Tabla 1. Se tomó una de las fracciones de suelo natural y se contaminó solo con un tipo de agua residual. Cada fracción de suelo se subdividió en tres fracciones y cada una de ellas se contaminó con un porcentaje definido de agua residual, p.ej. 35%, 55% y 75% de agua residual industrial o municipal.

**Tabla 1.** Características de las aguas residuales empleadas.

Parámetro	AR Municipal	AR Industrial
pH	7.6	3.3
Temperatura, °C	25	25
DQO, mg/l	538	71775
Sólidos totales, mg/l	1014	24378
Coliformes fecales, NMP/100 ml	>240000	40
Nitrógeno total, mg/L	52	20
Fósforo total, mg/L	23	218

Para llevar a cabo la contaminación de cada fracción de suelo, éste se disgregó y se le agregó la cantidad de agua requerida para obtener el nivel de contaminación definido. Posteriormente se dejó reposar el suelo durante un periodo de tres semanas y posteriormente se analizó.

Los análisis realizados tanto para el suelo natural como para los suelos contaminados fueron: pH, granulometría, límites de Atterberg, clasificación SUCS y ensayo triaxial consolidado-drenado.

### 3. Resultados

#### 3.1. pH

El suelo en su estado natural tuvo un pH de 7.9, por lo que se le considera como medianamente alcalino. Independientemente del agua residual empleada para contaminar el suelo; su pH tendió a disminuir conforme se incrementó la concentración de agua residual en el suelo. En el caso de las muestras de suelo contaminadas con el AR industrial el suelo se acidificó, llegando a presentar un pH de 7.5 el cual se encuentra dentro del rango de los suelos medianamente alcalinos. En las muestras contaminadas con el agua residual municipal el efecto de acidificación fue menor, alcanzando valores de hasta 7.8.

#### 3.2. Granulometría

Los resultados muestran que conforme se incrementa la concentración del AR en el suelo, el porcentaje de suelo que pasa la malla No. 200 (0.074 mm) incrementa, mientras que el porcentaje de suelo retenido entre las mallas No. 4 y No. 40 disminuye. Para el caso del suelo contaminado con AR municipal, el contenido de arenas y arcillas permaneció constante independientemente del nivel de contaminación del suelo. Sin embargo, el contenido de limos disminuyó 9% y de coloides se incrementó en 10% conforme se incrementó la concentración de AR en el suelo hasta el 75%. Una posible explicación sobre este comportamiento puede deberse a la distribución del tamaño de partículas presentes en el AR empleada. No obstante, las metodologías aplicadas para la caracterización de las aguas residuales no permiten validar esta suposición.

Para el suelo contaminado con el AR industrial, el contenido de arenas se redujo cerca del 50% y el contenido de limos y arcillas se incrementó 8% y 35%, respectivamente, conforme se incrementó la concentración de AR en el suelo. Asimismo, se logró establecer una tendencia descendente en los valores de los coeficientes de uniformidad y curvatura de los suelos contaminados con el AR industrial. Es decir, conforme aumentó la concentración del AR industrial en el suelo estos parámetros disminuyeron su valor, teniendo así partículas de suelo con menor curvatura y uniformidad. Para el caso de los suelos contaminados con AR municipales no observó ninguna tendencia.

#### 3.3. Límites de consistencia y clasificación SUCS

Los resultados obtenidos de la prueba de límites de consistencia de Atterberg se pueden apreciar que a mayor concentración del agua residual utilizada para la contaminación del suelo los valores de límite líquido (LL%), límite plástico (LP%) e índice plástico (IP%) aumentan, resultando así un suelo mayormente compresible.

Para el suelo contaminado con el AR municipal se observó que el LL incrementó de 46% a 95% y el IP aumentó del 42% al 50%, conforme se incrementó el contenido de AR del 0% al 75%. Un comportamiento similar se observó en las muestras contaminadas con el AR industrial, en las cuales el LL aumentó de 76% a 97% y el IP pasó de 42% a 57%, conforme se incrementó el contenido de AR del 0% al 75%.

En el caso del suelo contaminado con el AR industrial, independientemente de la concentración de contaminante presente en el suelo, la contracción lineal del suelo no

presentó un incremento significativo. Una tendencia similar se observó para el caso del suelo contaminado con el AR municipal.

A pesar de la variación de los valores del IP y del LL para las muestras de suelo contaminadas con las diferentes aguas residuales, no se presentó un cambio en su clasificación SUCS, la cual se mantuvo como OH<sub>1</sub> – Arcilla orgánica de alta compresibilidad.

### 3.4. Parámetros geomecánicos

La muestra de suelo no contaminado presentó un ángulo de fricción interno muy bajo y una cohesión de 8 t/m<sup>2</sup>, es decir, su comportamiento mecánico es principalmente cohesivo. Sin embargo, conforme aumentó la concentración del AR industrial, el ángulo de fricción interno aumentó 3.5 veces y la cohesión disminuyó 31%. Para el caso del suelo contaminado con AR municipal dichos valores aumentan hasta 6.25 veces y disminuyeron 50%, respectivamente. Con base en lo anterior se establece que el comportamiento mecánico del suelo se vuelve mayormente friccionante conforme aumenta la concentración del AR.

## 4. Conclusiones

Se determinaron las propiedades geotécnicas de una arcilla expansiva en estado natural y contaminada con diferentes aguas residuales y se encontró que los límites de consistencia de Atterberg indican un aumento en el límite líquido y límite plástico, haciendo al suelo mayormente compresible conforme la concentración de las aguas residuales aumenta. El pH del suelo mostró que este parámetro disminuye conforme la concentración de contaminante aumenta, haciendo en todo momento un suelo más ácido que en su estado natural.

Conforme se incrementó la concentración de las aguas residuales en el suelo, la cohesión disminuye hasta 50% mientras que el ángulo de fricción interno aumenta hasta 6.25 veces para el caso más crítico que corresponde a la concentración de 75% de aguas residuales municipales en el suelo. Es importante mencionar que dicho suelo, una vez contaminado, se comporta de manera friccionante y se puede trabajar para el diseño de proyectos geotécnicos de manera errónea, poniendo en riesgo la construcción de edificaciones que dependen principalmente de la capacidad de carga del suelo.

Con base en los resultados anteriores se concluye que un suelo natural, al exponerse a la acción de un agente contaminante como es el caso del agua residual, se ve afectado en sus propiedades mecánicas haciendo que se ponga en riesgo la integridad estructural de la infraestructura desplantada sobre dicho suelo.

## Referencias

- [1] Tchobanoglous, G.; Burton F. L.; Stensel H. D. (2003). "Wastewater engineering: Treatment and reuse". 4th edition, McGraw-Hill, USA.
- [2] Siebe C. (1994). "Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México". *Rev. Int. Contam. Ambient.*; 10:15–21.
- [3] Hegazy A. A. E. (2014). "Chemical analysis of wastewater-contaminated ground soil in Arar, Saudia Arabia". *Int. J. Civ. Eng.*; 3:15–24.

- [4] Jiménez-Cisneros B. (1995). "Wastewater reuse to increase soil productivity". *Water Sci. Technol.*; 32:173–180.
- [5] Laurenson, S.; Houlbrooke D. (2011). "Winery wastewater Irrigation - The effect of sodium and potassium on soil structure". New Zealand.
- [6] Gosh, S.; Gangopadhyay; Banerjee. B. (1997). "The effect of industrial contaminants on the properties of soil and some remedial measures". En: R.W. Sarsby, ed. *Contaminated and Derelict Land: The Proceedings of GREEN2: the second international symposium on Geotechnics related to environment*. Kraków, Poland.
- [7] Karkush M. O.; Kareem M. S. A. (2015). "Behavior of Pile Foundation Subjected to Lateral Cyclic Loading in Contaminated Soils". *J Civ. Eng Res.*; 7:731–5.
- [8] Curiel-Íñiguez N-P; Hernández-Mendoza C.E. (2018). "Efecto de la contaminación con gasolina en las propiedades geotécnicas de una arcilla expansiva". *Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería*; 1(1):1-9.
- [9] Cabello-Suárez L.Y.; Pérez-Rea M.L.; Galaviz-González R.; Rojas E.; Hernández-Mendoza C.E. (2017). "Impact of diesel contamination on the compressibility of a clayey soil". 2017 XIII International Engineering Congress (CONIIN), Santiago de Querétaro, México, pp. 1-5. doi: 10.1109/CONIIN.2017.7968191