



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---

**Instituto De Investigaciones En Ciencias De La  
Tierra**

**Evaluación de la porosidad y propiedades del  
transporte interno en perfiles de suelos de zonas  
geotérmicas, caso de estudio Acoculco, Puebla**

Que para obtener el grado de:

**Maestra en Geociencias y Planificación del Territorio**

Presenta

**Circe López Guillén**

Directora: Dra. María Lourdes González Arqueros

Co-Director: Dr. Armando Navarrete Segueda

Morelia, Michoacán. Noviembre de 2022



# Índice

Resumen .....	6
Abstract .....	8
1.Introducción .....	10
1.1Antecedentes .....	13
1.2Justificación .....	18
1.3 Preguntas de investigación .....	18
1.4 Hipótesis .....	19
1.5 Objetivos .....	19
2.Zona de estudio .....	20
3.Metodología .....	26
3.1 Caracterización y muestreo .....	26
3.2 Análisis de laboratorio .....	27
3.4 Análisis de datos .....	31
4. Resultados y discusión.....	32
4.1 Caracterización y evaluación macromorfológica.....	32
4.1.1 Evaluación de la capacidad de amortiguamiento de los suelos .....	38
4.2 Evaluación de la porosidad .....	40
4.3 Agrupación de los horizontes de acuerdo con las variables del suelo.....	43

4.4 Variables del suelo en función de los horizontes genéticos y la posición en el paisaje .....	47
4.5 Relaciones estadísticas de las variables del suelo .....	53
4.6 Similitud estadística entre horizontes y uso de suelo .....	59
6 Conclusiones .....	64
7 Referencias .....	65

## Contenido de figuras y tablas

Figura 1. Localización del área de exploración geotérmica de Acoculco, Puebla. ....	21
Figura 2. Clima de la zona geotérmica de Acoculco. ....	22
Figura 3. Paisajes de la zona de Acoculco, Puebla .....	23
Tabla 1. Uso de suelo y relieve de los perfiles de suelo de Acoculco, Puebla. ....	24
Figura 4. Uso de suelo y vegetación de la zona geotérmica de Acoculco, Puebla. ....	25
Figura 5. Muestreo de perfiles en campo. ....	26
Figura 6. Determinación de la porosidad con el programa imageJ. ....	30
Figura 7. Contenido de fragmentos rocosos de los horizontes de Acoculco, Puebla. ....	32
Figura 8. Clasificación granulométrica de horizontes de los perfiles de Acoculco, Puebla. .....	34
Figura 9. Contenido de materia orgánica de los horizontes de los perfiles de Acoculco, Puebla. ....	35
Figura 10. Comportamiento de las variables respecto a la profundidad. A) pH, B) Densidad aparente, C) Porosidad. La línea color azul indica la mediana. ....	36
Figura 11. Evaluación de la fuerza de enlace de los horizontes respecto a los elementos A) Cd, Ni, Al y Pb, B) Mn, Co, Cr <sup>III</sup> y Hg, C) Zn, Cu y Fe <sup>III</sup> .....	39
Figura 12. Espacio poroso total (%) de cada horizonte. ....	40
Figura 13. Fotografías de láminas delgadas representando la porosidad. ....	41
Figura 14. Tipos de poros (%) de cada horizonte. ....	43

Figura 15. Clasificación de los horizontes de acuerdo con las variables de pH, contenido de materia orgánica, contenido de rocas, porcentaje de arcillas, densidad aparente, capacidad de agua disponible y capacidad de aireación. ....	45
Figura 16. Gráficos de medias respecto al tipo de horizonte. ....	49
Figura 17. Gráficos de medias respecto al uso de suelo de los horizontes superficiales. ....	52
Figura 18. Correlación de Spearman de las variables asociadas al movimiento y/o transporte de elementos potencialmente tóxicos. ....	54
Tabla 2. Variables asociadas al movimiento/transporte de elementos potencialmente tóxicos y su efecto en el suelo. ....	55
Figura 19.A) Análisis de componentes principales (PCA) de las variables asociadas al transporte y/o movimiento de elementos potencialmente tóxicos. ....	58
Figura 20. Análisis factorial de datos mixtos (FAMD) de las variables asociadas al transporte y/o movimiento de elementos potencialmente tóxicos. ....	62

## Resumen

México presenta un gran potencial para el aprovechamiento de la energía geotérmica, la cual se considera una energía alternativa y amigable con el ambiente, no obstante, genera un efecto negativo sobre el suelo debido a la extracción de elementos potencialmente tóxicos durante la fase de exploración u operación de la planta geotermoeléctrica. La movilidad o retención los elementos potencialmente tóxicos estará influenciada por las propiedades de los suelos, mismas que pueden variar entre horizontes genéticos y/o por impacto del manejo (uso de suelo). El objetivo principal de esta investigación fue evaluar las propiedades macromorfológicas y micromorfológicas de los suelos del sitio geotérmico de Acoculco, Puebla, que influyen en la retención o movilización de elementos potencialmente tóxicos. Se describieron y muestrearon perfiles de suelos representativos de unidades geopedológicas del área de estudio. Se realizaron análisis macromorfológicos de color, textura, pH, densidad aparente, fragmentos rocosos, contenido de materia orgánica y determinación de la porosidad total. Los análisis micromorfológicos se realizaron mediante laminas delgadas y el programa ImageJ para la determinación del tipo de poros. Se realizó una comparación de medias a las propiedades de los suelos para identificar diferencias en propiedades indicadoras de movilidad de elementos potencialmente tóxicos en el suelo. Se realizaron análisis de correlación y de componentes principales para identificar gradientes en las propiedades de los suelos y se realizaron análisis factoriales de datos mixtos para explorar las relaciones entre las propiedades de suelos por horizonte y entre los diferentes usos de suelo. Los análisis mostraron que existe diferencias de pH, contenidos de materia orgánica y de texturas, mismos que son indicadores de la variación espacial de la

movilidad de elementos potencialmente tóxicos en los suelos. Los suelos del área de estudio mostraron un drenaje deficiente, siendo los poros tubulares los más abundantes, generan suelos con alta retención de agua. Los cambios en las propiedades están asociados, a nivel del perfil, con la variación de los horizontes genéticos, los horizontes B generan una mayor retención de elementos potencialmente tóxicos y, a nivel de paisaje, con el uso de suelo, los suelos de bosque de pino y de agricultura favorecen la movilidad de dichos elementos.

Palabras clave: **impacto ambiental, geopedología, micromorfología, elementos potencialmente tóxicos, y sitios geotérmicos.**

## **Abstract**

Mexico has great potential for the use of geothermal energy, which is considered an alternative energy and friendly to the environment, however, it generates a negative effect on the soil due to the extraction of potentially toxic elements during the exploration phase or operation of the geothermal power plant. The mobility or retention of potentially toxic elements will be influenced by soil properties, which may vary between genetic horizons and/or by management impact (land use). The main objective of this research was to evaluate the macromorphological and micromorphological properties of the soils of the geothermal site of Acoculco, Puebla, which influence the retention or mobilization of potentially toxic elements. Soil profiles representative of geopedological units of the study area were described and sampled. Macromorphological analyzes of color, texture, pH, apparent density, rock fragments, organic matter content and determination of total porosity were carried out. The micromorphological analyzes were carried out using thin sheets and the ImageJ program to determine the type of pores. A comparison of means to the properties of the soils was made to identify differences in properties indicating the mobility of potentially toxic elements in the soil. Correlation and principal component analyzes were performed to identify gradients in soil properties, and mixed data factor analyzes were performed to explore relationships between soil properties by horizon and between different land uses. The analyzes showed that there are differences in pH, organic matter content and textures, which are indicators of the spatial variation in the mobility of potentially toxic elements in the soil. The soils of the study area showed poor drainage, with tubular pores being the most abundant, generating soils with high water retention. The changes in the properties are associated, at the profile level, with the

variation of the genetic horizons, the B horizons generate a greater retention of potentially toxic elements and, at the landscape level, with the land use, the forest soils of pine and agriculture favor the mobility of these elements.

**Keywords:** environmental impact, geopedology, micromorphology, potentially toxic elements, and geothermal sites.

## 1. Introducción

Las energías renovables surgen como una alternativa para aminorar el impacto ambiental y la disminución de las reservas petroleras (SENER, 2009). Dentro de las energías renovables, la energía geotérmica es un elemento económico importante para México, ya que la mayor parte de su territorio se encuentra localizado geográficamente en una región con un gran potencial geotérmico. A nivel mundial, su capacidad geotérmica lo coloca como el sexto país con mayor potencial para el aprovechamiento de la energía geotérmica (Yépez, 2018).

El desarrollo de la energía geotérmica se considera una actividad ambientalmente responsable, ya que el posible impacto que pueda tener sobre los suelos, vegetación y cuerpos de agua puede ser mitigado con el uso responsable de los desechos líquidos y emisiones (Sandoval y Hodgson, 2012). Aunque cualquier transformación energética puede generar un impacto sobre el ambiente antes, durante y después de su generación (González, 2017), la energía geotérmica se considera limpia debido a que las emisiones consisten en vapor de agua, y solo un porcentaje mínimo corresponden a otro tipo de gases (Santoyo y Barragan, 2010).

Los impactos al ambiente que la energía geotérmica potencialmente pueden generar en el desarrollo del proyecto son mínimos, sin embargo en la etapa de exploración-evaluación y construcción de la central geotermoeléctrica incrementan generando: ruido, emisiones de gases, fluidos geotérmicos, hundimiento, microsismicidad y aguas salinas residuales, conocidas como salmueras geotérmicas (Seisdedos, 2012).

Uno de los recursos naturales que puede verse afectado en la etapa de exploración y operación de la central geotermoeléctrica y que es poco estudiado es el suelo. Los suelos son un recurso no renovable que brindan diversos servicios ambientales (Burbano, 2016).

En la etapa de exploración u operaciones de la planta geotermoeléctrica los principales elementos potencialmente tóxicos son: arsénico, mercurio, plomo, cadmio, hierro, zinc, manganeso y aluminio, afectando potencialmente la calidad del agua y del suelo de las áreas circundantes (Ramos et al., 2021). Los cuales son transportados o retenidos en cuerpos de agua y en el suelo de las áreas circundantes (Burbano, 2016; Ramos et al., 2021). Los elementos tóxicos cuando superan los niveles de contaminación permisibles generando degradación ambiental y riesgo a la salud pública (Jiménez y Olivera-Balderas, 2019).

Las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos en el suelo dependen de la cercanía a la fuente contaminante, ya sea natural debido a la actividad hidrotermal natural de la zona o antropogénica. La dispersión de estos elementos en algunas zonas se debe a la actividad humana (Leal et al., 2010), siendo un riesgo para el suelo de usos agrícola ya que puede promover la inserción de elementos potencialmente tóxicos a la cadena alimenticia y repercutir en la salud.

La movilidad de los elementos potencialmente tóxicos en los suelos depende de procesos de retención, lixiviación y/o erosión, mismos que dependen de algunas propiedades de los suelos (Rodríguez et al., 2019) siendo: contenido de fragmentos rocosos, textura, contenido de materia orgánica y arcillas, densidad aparente, capacidad de aireación, pH, porosidad y tipo de poros (Tabla 2). No obstante, la movilidad de estos elementos

representa un riesgo para la agricultura y el efecto de sus derivados sobre la salud humana (Galar y Romero, 2008)

Las propiedades de los suelos cambian según el paisaje y los factores biofísicos que lo definen ya que determinan procesos que definen las propiedades fisicoquímicas de cada tipo de suelo (Buol et al., 1989). Para obtener un resultado más eficaz en el estudio de las propiedades de los suelo es necesario usar herramientas de análisis que permitan estudiar sus variaciones que poseen en sus propiedades y para ello se aplican herramientas estadísticas (Siqueira et al., 2007). El análisis de las propiedades y condiciones actuales relacionadas al movimiento interno permite evaluar el transporte a partir del cual los elementos potencialmente tóxicos podrían potencialmente dispersarse a través de los suelos. El sitio geotérmico del área de Acoculco se encuentra en un estado de exploración, por lo que el presente trabajo pretende determinar las propiedades de los suelos que favorecen la retención y/o movilización de elementos potencialmente tóxicos en esta área y en su estado inicial, con el fin de establecer una línea base ambiental y se pueda proponer un monitoreo que permita la detención de una posible contaminación futura de los suelos debida a cualquier actividad geotérmica que se llegue a desarrollar en la zona.

## 1.1 Antecedentes

A nivel mundial se han llevado diversos estudios sobre la contaminación de los suelos a causa de la actividad geotérmica que se manifiesta de manera natural o se desarrolla de forma antropogénica en las zonas hidrotermales.

En 1982 en los Estados Unidos de América, Varekamp y Buseck estudiaron los suelos de una área geotérmica para determinar el nivel de Hg, colectando únicamente los horizontes A de suelos bien desarrollados. El Hg se analizó a través de un detector Jerome model 301 y los datos fueron sometidos a pruebas estadísticas. Los autores encontraron diferencias significativas de Hg en los suelos, y establecieron una relación entre los suelos cercanos a aguas termales y manifestaciones superficiales geotérmicas con las grandes cantidades de Hg. Los autores sugirieron que la liberación de vapor de los acuíferos y la movilización de Hg de los sedimentos de las corrientes generaban estas diferencias. Además de que propiedades del suelo, como el pH ácido, el contenido bajo de arcilla y la materia orgánica influyen en la distribución de los elementos potencialmente tóxicos en el suelo.

Un estudio realizado en Sudáfrica por Durowoju et al. (2016) determinó la contaminación en suelos cercanos a manantiales hidrotermales en dos temporadas, tomando muestras de agua y suelo de 0 a 15 cm de profundidad y a una distancia de 0 a 10 m del manantial. Las muestras fueron sometida a análisis químicos y pruebas de estadística descriptiva. Los resultados mostraron que existían elementos potencialmente tóxicos producto de la naturaleza de los manantiales hidrotermales y la pedogénesis, con concentraciones altas de Cr, Co, Ni, Zn y Pb. Presentando una variación estacional significativa en sus

concentraciones, siendo mayores en la temporada de verano debido a las altas precipitaciones.

Balaban et. al. (2017) determinaron los efectos ambientales de los fluidos geotérmicos en agua, suelos y sedimentos de arroyos en áreas geotérmicas en Anatolia. Para ello colectaron muestras de agua que fueron sometidas a análisis químicos, asimismo muestrearon suelos y sedimentos de los arroyos. Los resultados mostraron que el As, B, Br, Fe y Ni son los principales contaminantes en el agua excediendo el límite permitido derivados de reservorios geotérmicos en condiciones no adecuadas permitiendo su permeabilidad, y debido a su precipitación eran los causantes de la contaminación de los suelos y sedimentos.

En Arabia, Monged et. al. (2018) realizaron un estudio de calidad de agua en manantiales hidrotermales y su impacto en los suelos. Para ello usaron índices de cálculo de contaminación y evaluación de riesgos de algunos elementos potencialmente tóxicos. Concluyendo que los suelos tuvieron bajo enriquecimiento de elementos potencialmente tóxicos provenientes de las aguas termales. A excepción del Hg, donde se encontró en grandes concentraciones en una zona, a pesar de que estas concentraciones no implicaron ningún riesgo.

En México son escasos los trabajos que se han llevado a cabo sobre la contaminación del suelo por actividad geotérmica. Los estudios están enfocados a la calidad de agua por la actividad geotérmica, en cuanto a estudios de la porosidad del suelo en el país, se han hecho varios, la mayor parte de estos son con un enfoque agronómico.

Pastrana et. al. (2005) presentaron el marco jurídico ambiental que rige la operación del campo geotérmico de los Humeros, así como la gestión elaborada para mitigar el impacto

ambiental. Para el caso de los suelos, se tomaron muestras de la zona afectada por la planta geotermoeléctrica y se analizaron químicamente. La caracterización fisicoquímica mostró que no existe diferencia entre suelos para un periodo de cuatro años (1990-1994), por lo tanto, las acciones ambientales lograron mitigar y controlar los impactos ambientales producto del proyecto geotermoeléctrica.

En la planta geotérmica de Cerro Prieto se llevó a cabo un estudio por (Pastrana-Corral et al. 2016) para evaluar si las emisiones que se generaban en la planta geotérmica aumentaban la cantidad de Hg en el suelo de las zonas cercanas. Para ello colectaron 54 muestras de suelo a distintas distancias del complejo a una profundidad de 0-5 cm y 0-100 cm. Las muestras fueron sometidas a análisis de detección de Hg, espectrometría de absorción atómica, pH, contenido de materia orgánica, textura y pruebas de correlación. Encontraron relación entre la concentración de Hg en los suelos y la distancia a la planta, así como la dirección de viento.

Díaz-Hinojosa (2017) realizó una evaluación de impacto socio-ambiental del campo geotérmico Cerro Prieto, en Baja California. Tomaron muestras superficiales de suelos (30 cm), realizaron la descripción macromorfológica, determinaron su salinidad, y determinaron metales pesados por espectrometría de absorción atómica. Los resultados mostraron que todos los perfiles de la zona contenían concentraciones por debajo del límite permitido por la NOM.147 (SEMARNAT, 2004), a excepción de tres perfiles que rebasaron el límite de arsénico, demostrando que los suelos con pH alcalino tienden a presentar poca movilidad de los elementos potencialmente tóxicos.

En la planta geotérmica de Cerro Prieto González-Acevedo et al. (2018) estudiaron el agua, suelo, plantas y aire de la zona para determinar las concentraciones de elemento

potencialmente tóxicos, las pruebas de agua fueron sometidas a espectrometría de masas de plasma, los suelos fueron analizados con fluorescencia de rayos X al igual que las muestras de plantas, las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos fueron correlacionados estadísticamente para identificar las asociaciones con el agua, suelo y plantas. Determinando que tanto el agua como aire se encuentran elementos de origen geotérmico (As, Ca, K, Mo, Na, Sb), las plantas presentaron altas concentraciones de S y el suelo presento una contaminación moderada de S y elementos de origen geotérmico (Mn y Zn).

En un estudio no relacionado con áreas geotérmicas, pero que utilizan el mismo método que este estudio para determinar la microporosidad del suelo, Prado et. al. (2009) estudiaron la red de poros y microporosidad en suelos cultivados de la cuenca del Valle de Bravo, con el fin de determinar el transporte de agua y solutos. La porosidad fue evaluada a través de láminas delgadas, determinando el área total de porosidad y el área de cada uno de los poros. Los poros fueron clasificados en cuatro clases de acuerdo con su forma y alargamiento calculado por el índice  $la$ . Como resultado, obtuvieron que los poros tubulares eran los más abundantes generando una alta retención de agua, mientras que la conectividad y conexión de los poros era mayor en los horizontes superficiales debido a la actividad de arado, pero también este, era el causante de la destrucción de poros bien definidos.

México cuenta con 20 zonas geotérmicas con potencial (Hiriart et. al.,2011) El área de estudio de este proyecto es una de ellas, el campo geotérmico de Acoculco, es un punto de interés reconocido a través del programa de exploración regional elaborado por la

comisión federal de electricidad en México (CFE). Esta zona presenta alteración hidrotermal superficial, con aguas ácidas frías y emanación de gases (López et al., 2009).

Dentro de los estudios llevados a cabo en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla, la mayor parte se enfoca en la caracterización geoquímica del agua y gases desprendidos, así como su estudio en cuanto a la capacidad del yacimiento para producir energía eléctrica.

El primer estudio de exploración geotérmica llevado a cabo en la zona de Acoculco fue en los años 80. Por medio de análisis geoquímicos determinaron que los fluidos de la zona son de tipo sulfatado-ácido, originados de una mezcla de H<sub>2</sub>S geoseoso de origen hidrotermal con H<sub>2</sub>O superficial (Hinojosa, 1994).

En estudios más recientes, Viggiano et. al. (2011) determinaron los componentes químicos de los gases emitidos en la zona de Acoculco, siendo en su mayoría CO<sub>2</sub>, asimismo, Quinto et. al. (1995) evaluaron los niveles de contaminación en las manifestaciones hidrotermales de Acoculco, encontrando niveles de concentración superiores a los que permiten las normas ecológicas.

## **1.2 Justificación**

Los estudios realizados en la zona de Acoculco, Puebla, demuestran que es una zona hidrotermal con potencial de presentar suelos que se puedan ver afectados por elementos potencialmente tóxicos. A su vez, Acoculco, Puebla, presenta un yacimiento geotérmico de gran potencial que actualmente se encuentra en fase de exploración. Por lo que su estudio permitirá evaluar el estado base de los suelos y determinar su susceptibilidad a ser afectados por procesos hidrotermales y actividades antropogénicas propias de la zona.

México no cuenta con una investigación formal sobre el impacto ambiental derivado de la actividad geotérmica en suelos (González, 2016), por lo que este trabajo marca una pauta en la propuesta metodológica para estudiar las propiedades fisicoquímicas de los suelos, y evaluarlas de acuerdo con el impacto positivo o negativo sobre la movilización y/o acumulación de elementos potencialmente tóxicos que lleguen al suelo.

## **1.3 Preguntas de investigación**

- 1.- ¿Los suelos de Acoculco, Puebla, presentan diferencias en sus propiedades que influyen en la movilidad o retención de elementos potencialmente tóxicos?
- 2.- ¿Los indicadores ambientales biofísicos (relieve, suelo, cobertura vegetal y usos de suelo) y horizontes genéticos tienen efecto sobre la susceptibilidad de los suelos de Acoculco, Puebla, para movilizar o retener elementos potencialmente tóxicos?

## **1.4 Hipótesis**

Las propiedades fisicoquímicas de los suelos del sitio geotérmico de Acoculco, Puebla, difieren de acuerdo con el uso de suelo, horizontes y la pendiente de la geoforma bajo el que se encuentran. Evaluar las propiedades que son indicadores de transporte en el suelo como son: pH, densidad aparente, materia orgánica, capacidad de aireación, capacidad de agua disponible contenido de arcillas, porosidad y tipo de poros, permitirá establecer criterios sobre que suelos favorecerán el movimiento y transporte de elementos potencialmente tóxicos, y los cuáles favorecerán la acumulación de estos.

## **1.5 Objetivos**

Evaluar las propiedades de los suelos que favorecen la retención y/o movilización de elementos potencialmente tóxicos.

Específicos:

- Caracterizar macromorfológicamente los suelos mediante análisis fisicoquímicos.
- Evaluar la microporosidad a través de láminas delgadas.
- Evaluar las relaciones de las variables asociadas al transporte y/o movimiento de elementos potencialmente tóxicos y su diferencia acorde al tipo de horizonte genético, posición en el paisaje y uso de suelo.
- Determinar el efecto de los horizontes y uso de suelo en la movilidad y/o movimiento de elementos potencialmente tóxicos.

## **2. Zona de estudio**

Acoculco se encuentra entre los límites del estado de Hidalgo y Puebla, forma parte del municipio de Chignahuapan, Puebla. Se encuentra entre las coordenadas 19°47" y 20° 02" de latitud Norte y 95° 55" y 98° 20" de longitud Oeste, a una elevación entre los 2800 y 2900 msnm (Hiriart, 2011) (Figura 1).

El complejo volcánico Acoculco, dentro de La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), es un centro eruptivo que tuvo su formación por la acumulación producto de dos calderas, la de Tulancingo y la de Acoculco (Gutiérrez y Partida, 2016).

La caldera de Acoculco posee un diámetro de 18 km, su actividad volcánica tuvo una duración de 1.7 a 0.24 Ma. Las rocas de la zona son de origen volcánico tipo calcoalcalinas, rolita, ignimbrita, andesita, dacita, basalto y toba riolítica del Plioceno-Cuaternario (SGM, 2004). Se encuentra sobre una corteza continental de 50 km de grosor a 400 km donde la placa de cocos se sumerge en el manto (Sosa et al., 2018).

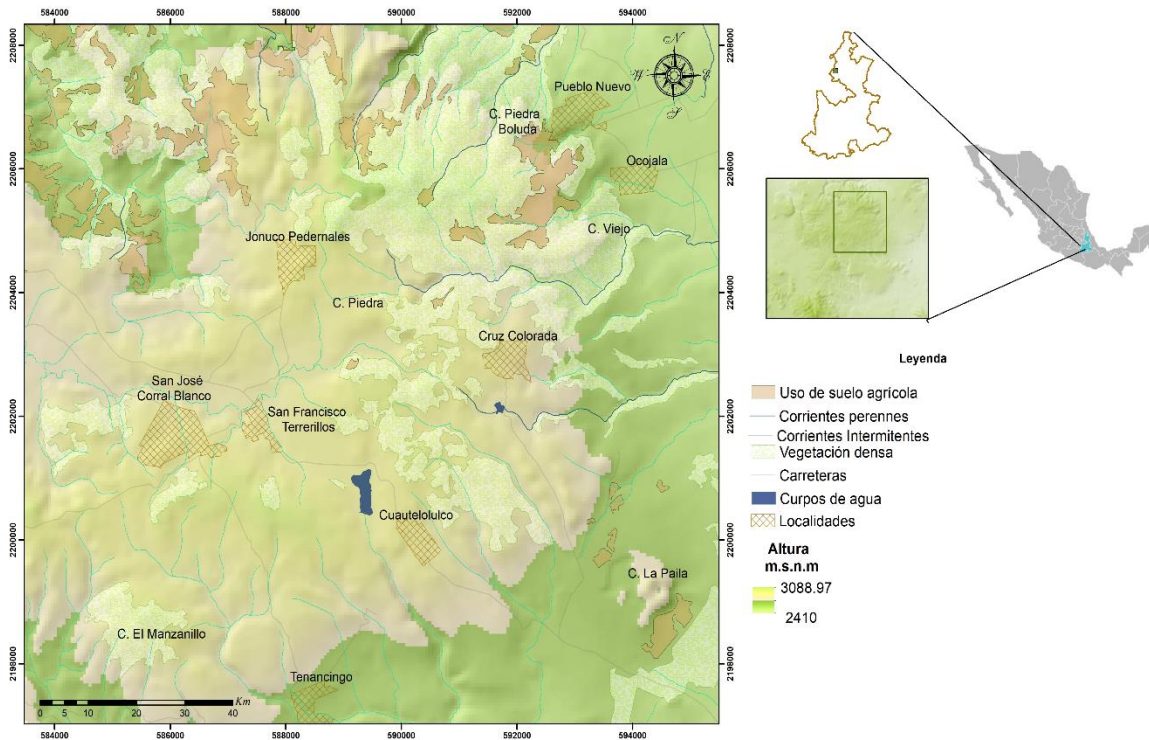


Figura 1. Localización del área de exploración geotérmica de Acapulco, Puebla.

Se ha reconocido como un sistema geotérmico de roca seca caliente de acuerdo a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), es un campo con gran potencial para el desarrollo de un sistema geotérmico mejorado para la producción de energía eléctrica (Avedaño, 2017).

El clima de la zona de Acapulco es templado subhúmedo, templado húmedo y semifrío húmedo (INEGI, 2008) (Figura 2).

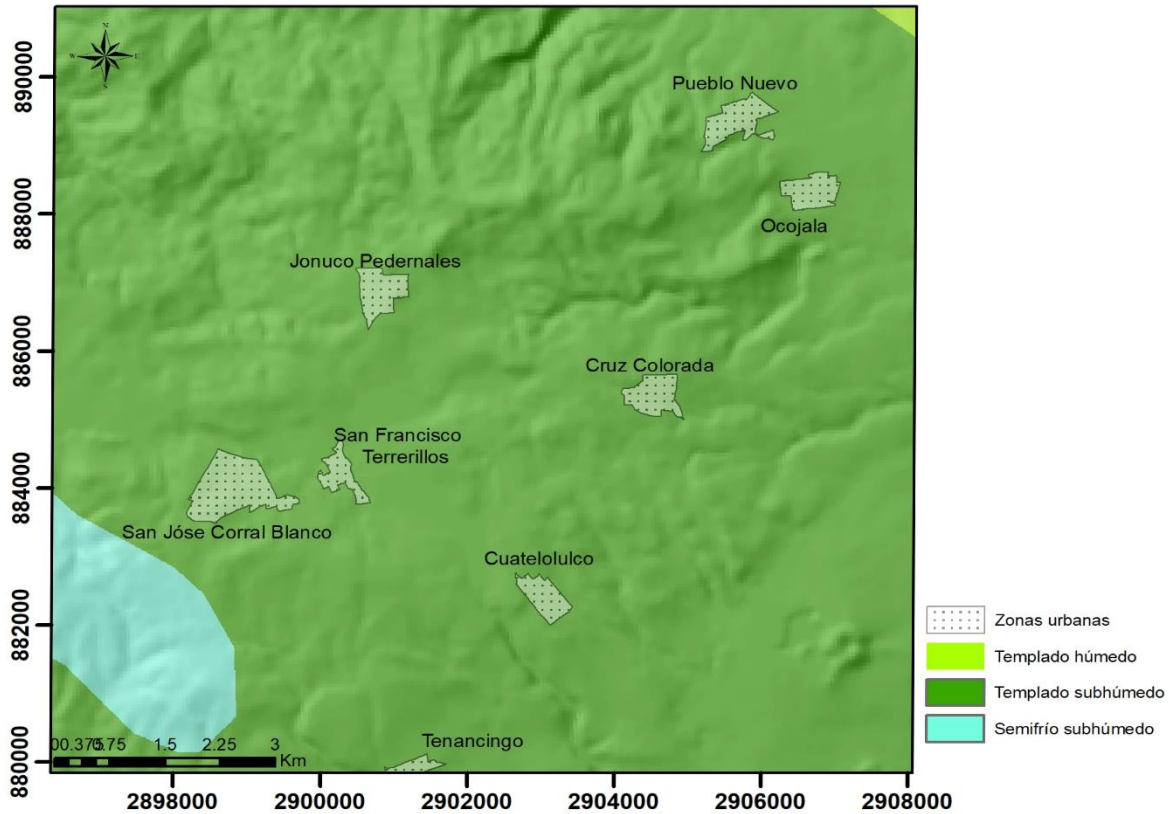


Figura 2. Clima de la zona geotérmica de Acapulco.

Presenta una precipitación promedio normal 910.5 mm, la época seca es en invierno, mientras que el verano y el otoño son las estaciones húmedas, otoño es la estación con mayor precipitación. La temperatura promedio anual máxima normal es de 19.2 °C mientras que la mínima es 4.5 °C de acuerdo a la estación meteorológica 13132 El Tepozán, con datos desde 1981 a 2017 (CONAGUA, 2017).

Las manifestaciones superficiales (Figura 3) de la actividad hidrotermal son escasas y consisten en aguas de baja temperatura, la temperatura del agua va de los 13°C a 25°C, son de tipo sulfatada-ácida, bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-sódica (Tello, 1986).

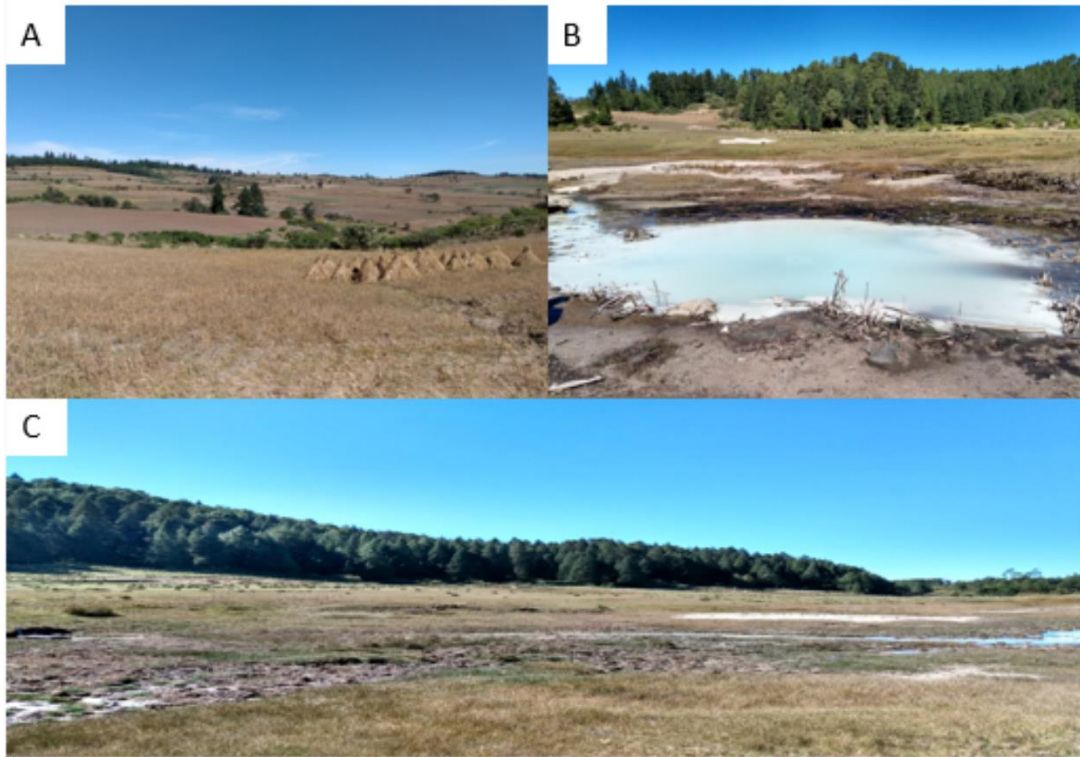


Figura 3. Paisajes de la zona de Acoculco, Puebla: A) Zona de uso de suelo agrícola, B) Manifestación hidrotermal, C) zona de uso de suelo de pastizal inducido en primer plano, al fondo uso de suelo de bosque de pino.

El tipo de vegetación del área corresponde a bosque de pino, pastizal inducido, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino, vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino, vegetación secundaria de bosque de pino-encino. Mientras que los usos de suelo principales son agricultura de temporal anual, agricultura de temporal permanente, agricultura de temporal anual y forestal (INEGI, 2017) (Figura 3, 4 y Tabla 1).

Tabla 1. Uso de suelo y relieve de los perfiles de suelo de Acoculco, Puebla.

<i>Perfiles de suelo</i>	<i>Uso del suelo</i>	<i>Relieve</i>
Aco-1	Agricultura de temporal anual	lomerio
Aco-2	Agricultura de temporal anual	planicie
Aco-3	Agricultura de temporal anual	ladera
Aco-4	Agricultura de temporal anual	ladera
Aco-5	Agricultura de temporal anual	ladera
Aco-6	Bosque de pino	ladera
Aco-7	Bosque de pino	ladera
Aco-8	Vegetación secundaria arbustiva de encino	planicie
Aco-9	Vegetación secundaria arbustiva de pino	ladera
Aco-10	Bosque de Pino	planicie
Aco-11	Bosque de Pino	ladera
Aco-12	Agricultura de temporal permanente	ladera
Aco-13	Agricultura de temporal anual	ladera
Aco-14	Pastizal inducido	ladera
Aco-15	Vegetación secundaria arbustiva de pino/encino	ladera
Aco-16	Agricultura de temporal anual	ladera
Aco-17	Agricultura de temporal anual	ladera
Aco-18	Agricultura de temporal anual	planicie
Aco-19	Vegetación secundaria arbustiva de pino	ladera
Aco-20	Vegetación secundaria arbustiva de pino	ladera

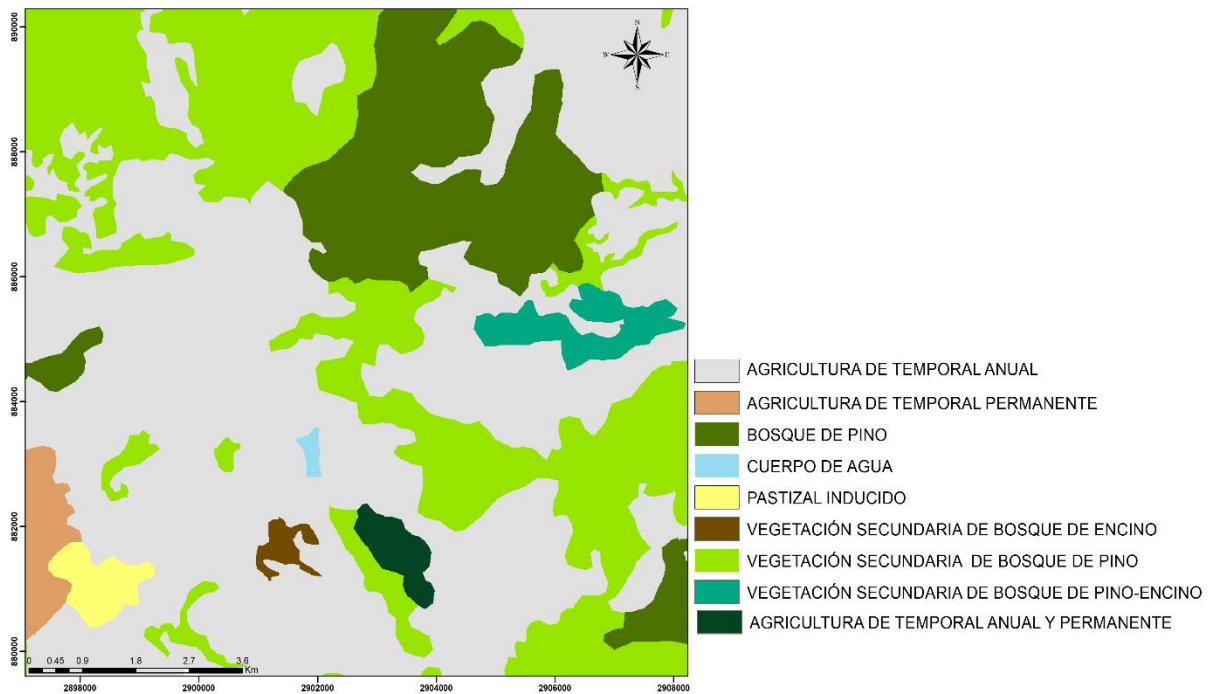


Figura 4. Uso de suelo y vegetación de la zona geotérmica de Acoculco, Puebla.

Los principales tipos de suelo son Phaeozems, Andosoles, Arenosoles, Regosoles, Histosoles y Luvisoles (INEGI, 2007).

### 3. Metodología

#### 3.1 Caracterización y muestreo

La localización de los perfiles de suelo representativos se realizó con base en las unidades geopedológicas descritas en un estudio previo (González-Arqueros, comunicación personal).

Se describieron y muestrearon 20 perfiles de acuerdo con el manual Soil Science Division Staff (1993) (Figura 5). La evaluación edafocológica se realizó de acuerdo al Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo de Siebe et al. (2006).



Figura 5. Muestreo de perfiles en campo. A) Zona agrícola. B y C) Zona de bosque de pino. D) Zona de vegetación secundaria de pino-encino.

Para el muestreo se delimitaron los horizontes y se tomaron muestras perturbadas y no perturbadas (mediante bloques de suelo), en campo se registraron la temperatura y humedad por horizonte (Huaman, 2016).

### 3.2 Análisis de laboratorio

Las muestras perturbadas se secaron al aire libre hasta su secado completo. Posteriormente se tamizaron con un tamiz No. 10 (<2 mm) y se calculó el porcentaje de fragmentos finos y gruesos, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\% FG = \frac{PFG}{PFT} \times 100$$

$$\% TF = \frac{PTF}{PFT} \times 100$$

Donde:

FG: fragmentos gruesos

TF: muestra tamizada

PFG: peso en gramos de los fragmentos gruesos

PTF: peso en gramos de la tierra fina

PFT: peso total de la muestra

El material que traspasó el tamiz (<2 mm) fue usado para los análisis físicos y químicos de los suelos.

El pH, fue determinado en solución 1:2.5 de KCl y en H<sub>2</sub>O destilada analizando el valor con un potenciómetro HANNA previamente calibrado (Gómez, 2013).

La porosidad se determinó a partir de la densidad aparente con el método del cilindro de volumen conocido (Flores y Alcalá, 2010) usando las fórmulas:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{PesoSuelo(g)} - \text{PesoSueloseco(g)}}{\text{Pesosueloseco(g)}} \times 100$$

$$DA = \frac{\text{PesoSueloSeco(g)}}{\text{VolumenCilindro (cm}^3\text{)}}$$

La materia orgánica se determinó a partir del contenido de carbono orgánico por el método de Walkley y Black de acuerdo con la normatividad nacional e internacional (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002; Walkley y Black, 1934) utilizando un factor de corrección recomendado para los suelos de México según la norma NOM-021-SEMARNAT-2000. Se calculó la materia orgánica a partir del resultado de carbono orgánico y el factor de Van Benmelen, que se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Materia orgánica} = \% \text{ C orgánico} * 1.724$$

La textura se determinó en el laboratorio por el método de Bouyoucos (Bouyoucos 1962; NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002). Previamente se eliminó la materia orgánica con peróxido de hidrogeno al 30 % en una placa calefactora.

La estimación de la fuerza de enlace de los horizontes respecto a los elementos potencialmente tóxicos Fe <sup>(III)</sup>, Hg, Pb, Cr <sup>(III)</sup>, Cu, Al, Zn, Co, Ni, Mn y Cd se obtuvo con dos valores, el valor de la movilidad de cada elemento respecto al pH de cada horizonte y el valor de la capacidad de absorción de los elementos, de acuerdo al contenido de materia orgánica y arcillas de cada horizonte, ambos valores se sumaron y con la tabla

de evaluación de fuerza de enlace de Siebe et al., 2006. Se obtuvo un valor final que corresponde a la capacidad de cada horizonte para retener los elementos potencialmente tóxicos.

### **3.3 Evaluación de la porosidad**

Los bloques de muestra no perturbada fueron enviados al Laboratorio de Edafología, Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos, del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo (Texcoco, Edo. de México) para la elaboración de láminas delgadas. Los bloques se impregnaron a temperatura ambiente con resina cristal MC-40.

La porosidad se evaluó a través de láminas delgadas, mediante fotografías que fueron analizadas en el software ImageJ. Este software permitió transformar las fotografías a imágenes binarias de 8 bits. De esta manera se consiguió distinguir la matriz del suelo de los espacios porosos a través de la intensidad de colores modificando manualmente, y así obteniendo el área y perímetro de cada poro con la herramienta de análisis de partículas (Prado et al., 2009) (Figura 6).

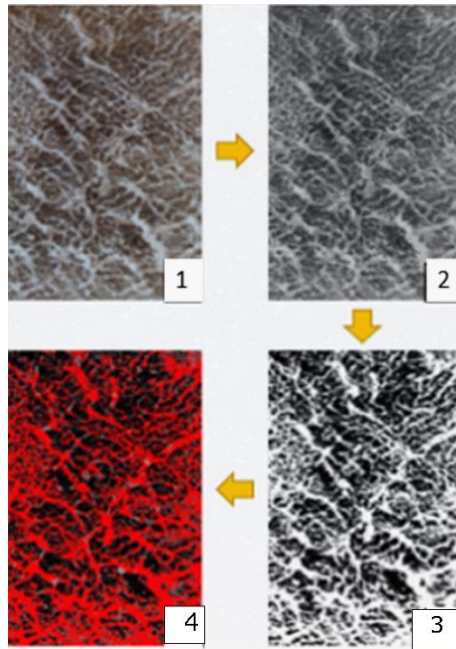


Figura 6. Determinación de la porosidad con el programa imageJ. 1) Imagen original. 2) Imagen a escala de grises. 3) Modificación de la intensidad de colores. 4) Selección de los espaciosos porosos.

Con los datos obtenidos se determinó el área porosa total se determinó la forma de cada poro de acuerdo con el índice de alargamiento ( $l_a$ ) usando la fórmula:

$$l_a = P^2 / (4\pi A)$$

Donde:

$l_a$ : forma del poro

P: perímetro de cada poro

$4\pi A$ : área de la superficie de cada poro

El índice de alargamiento se utilizó para clasificar los poros en tubulares ( $l_a < 2$  mm), de fisura ( $l_a 2-10$  mm), y de empaquetamiento ( $l_a > 10$  mm) (J. González-Barrios et al., 2011).

### 3.4 Análisis de datos

Se emplearon los Algoritmos de pedología cuantitativa (AQP, por sus siglas en inglés) propuestos por Beaudette et al. (2022) para representar la variación de las propiedades fisicoquímicas entre horizontes y perfiles de suelo. Se analizó si existe diferencia en las propiedades de los suelos entre horizontes, relieve y uso de suelo. Se utilizó un análisis de clasificación (*Cluster*) para agrupar los perfiles de suelo por sus propiedades de transporte. En este último, se emplearon propiedades indicadoras de movilidad de agua y elementos potencialmente tóxicos en el suelo, estas fueron pH, fragmentos rocosos, densidad aparente, capacidad de aireación, capacidad de agua disponible, contenido de materia orgánica y contenido de arcillas.

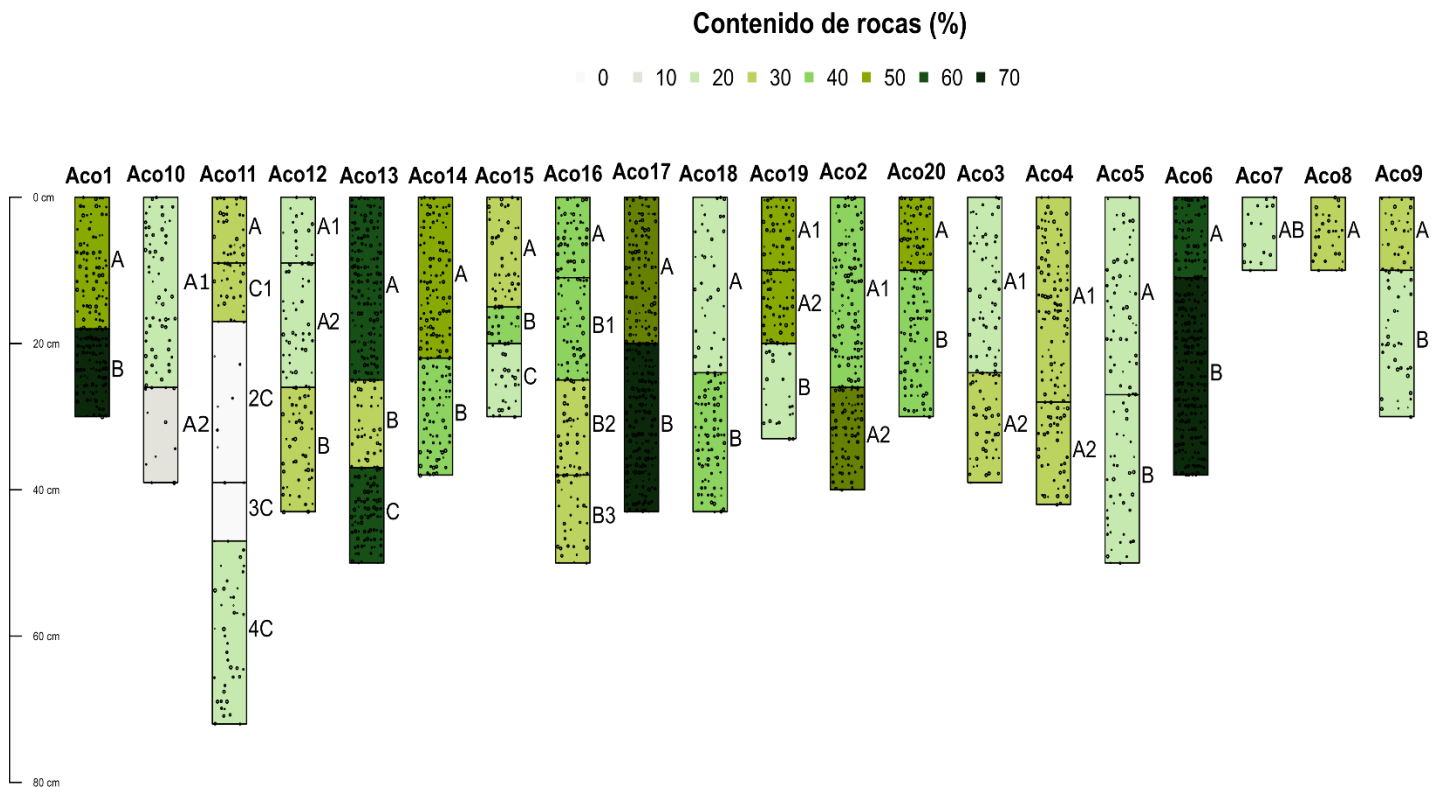
Se analizó la relación de las variables asociadas al movimiento y/o transporte a través de una correlación de Spearman (Kassambara, 2017) y a través de un análisis de componentes principales (PCA). Se estableció el tipo de relación presente entre las variables correlacionadas (Kassambara, 2004). Las variables que se consideraron fueron pH, fragmentos rocosos, densidad aparente, capacidad de aireación, capacidad de agua disponible, contenido de materia orgánica y contenido de arcillas. Para obtener la similitud de los horizontes se realizó un análisis factorial de datos mixtos (FAMD) usando las variables cuantitativas asociadas al movimiento y/o transporte y las variables cualitativas uso y horizontes (Kassambara, 2004). Todos los análisis se realizaron con el software R.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Caracterización y evaluación macromorfológica

Los perfiles más someros fueron Aco7 y Aco8 (0-10 cm). Por el contrario, el perfil Aco11 fue el de mayor profundidad (72 cm) (Figura 7A). El 60 % de los perfiles presentó un contenido de rocas <50 %, el perfil Aco11 presentó el menor porcentaje de rocas (3 %) en los horizontes 2C y 3C. Mientras que los perfiles Aco1, Aco6 y Aco17 presentaron el porcentaje más alto (> 60 %) en los horizontes B (Figura 7A).

Figura 7. Contenido de fragmentos rocosos de los horizontes de Acoculco, Puebla.



De acuerdo con la clasificación granulométrica (Figura 8), la textura franco-arcillosa fue la más frecuente representando el 25 % de los horizontes, mientras que la textura arcillo arenosa fue la menos frecuente representando solo el 2 %. Los horizontes principalmente

se agruparon en dos clases de texturales. Por un lado, los horizontes que presentan textura franca donde el agua y el aire circula de manera satisfactoria debido a que existen tanto poros pequeños como grandes en una proporción adecuada (Moreno, 2000) (Tabla 2) lo cual, potencialmente, favorece la movilidad de elementos a través del flujo del agua (Rodríguez et al., 2019), y por otro lado, los horizontes que presentan texturas arcillosas, donde se tienen menor número de macroporos, dominando los microporos, lo cual favorecen que los elementos potencialmente tóxicos presenten dificultad en su movimiento debido a la permeabilidad lenta del flujo del agua y alta retención (Corpoica, 2000).

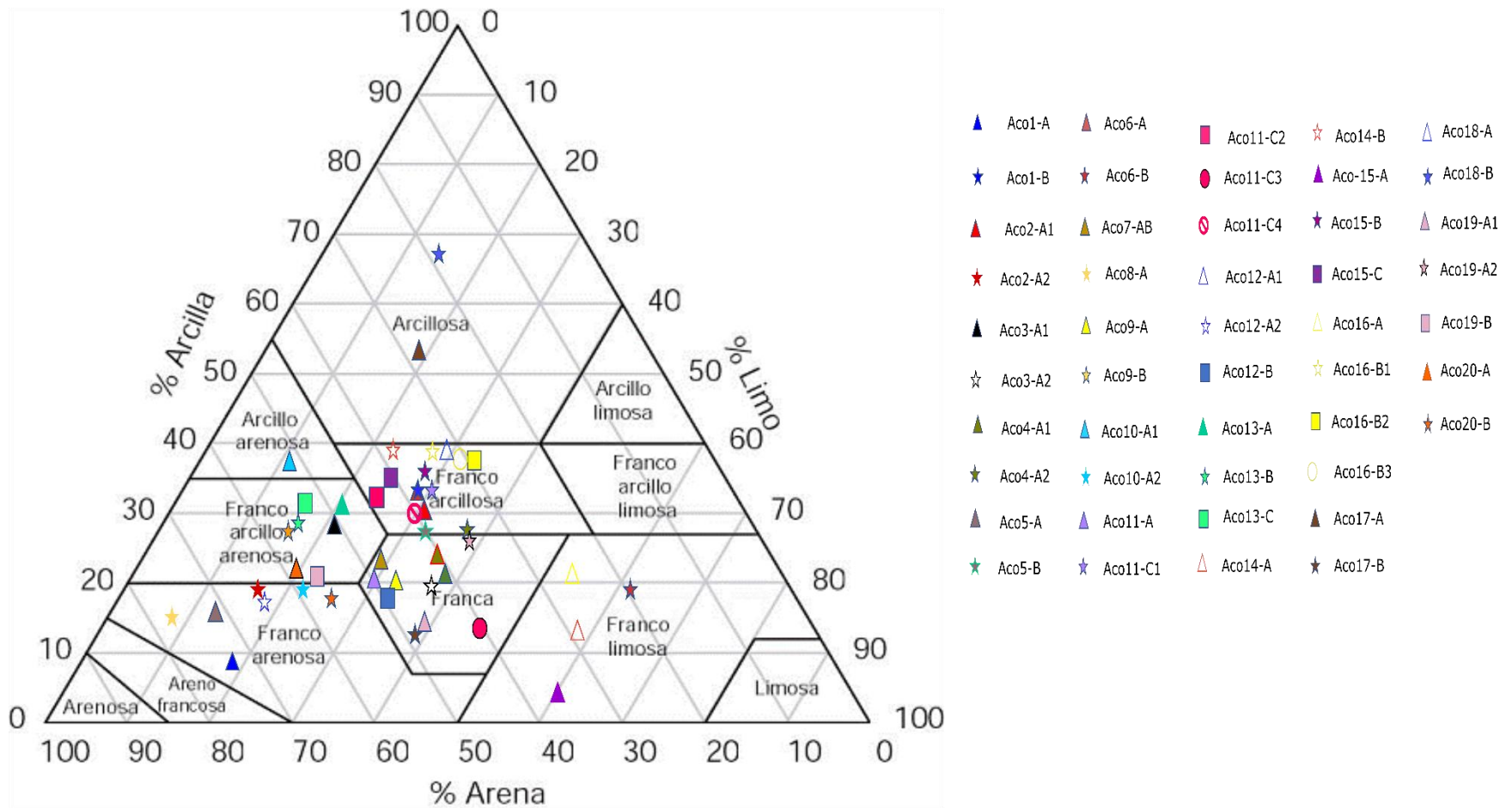


Figura 8. Clasificación granulométrica de horizontes de los perfiles de Acozulco, Puebla.

El 70 % de los horizontes presentó concentraciones de materia orgánica menor al 5 % (Figura 9). El perfil Aco10 en el horizonte A, presentó el porcentaje más alto (18 %). Los horizontes que presentan mayor contenido de materia orgánica (>5) tienen una alta capacidad de adsorción de elementos potencialmente tóxicos disueltos en la solución del suelo (Chaperon y Sauvé, 2007) (Tabla 2), así como una disminución de la pérdida de elementos por procesos de lixiviación (Medina et al., 2017) (Tabla 2) sin embargo al presentar mejor permeabilidad favorecen la movilidad de los elementos no adsorbidos (Rodríguez et al., 2019).

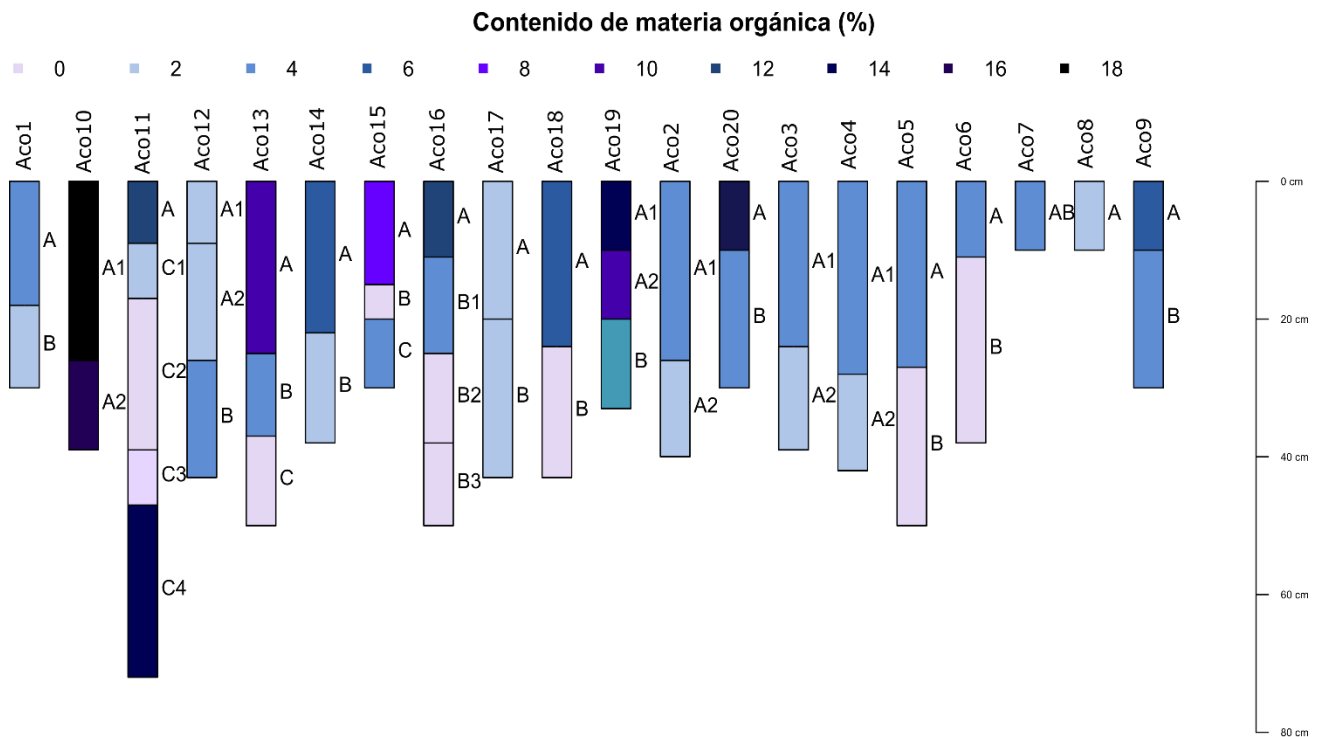


Figura 9. Contenido de materia orgánica de los horizontes de los perfiles de Acozulco, Puebla.

Los valores de pH de acuerdo con la clasificación de Rivera (2018) indican que los horizontes van de ligeramente ácidos a extremadamente ácidos, por lo que tenderán a tener mayor movilidad los elementos potencialmente tóxicos de acuerdo a lo encontrado por Díaz-Hinojosa (2017) ya que se pueden solubilizar en la solución del suelo.

De forma general, los perfiles mostraron pH más ácidos en los primeros centímetros de profundidad, acides que disminuyo a profundidades mayores a los 40 cm (Figura 10 A) debido a que los horizontes superiores presentan mayor contenido de materia orgánica (Bear, 1969), liberando CO<sub>2</sub> y ácidos orgánicos que generan una disminución del pH (Ji, 2014).

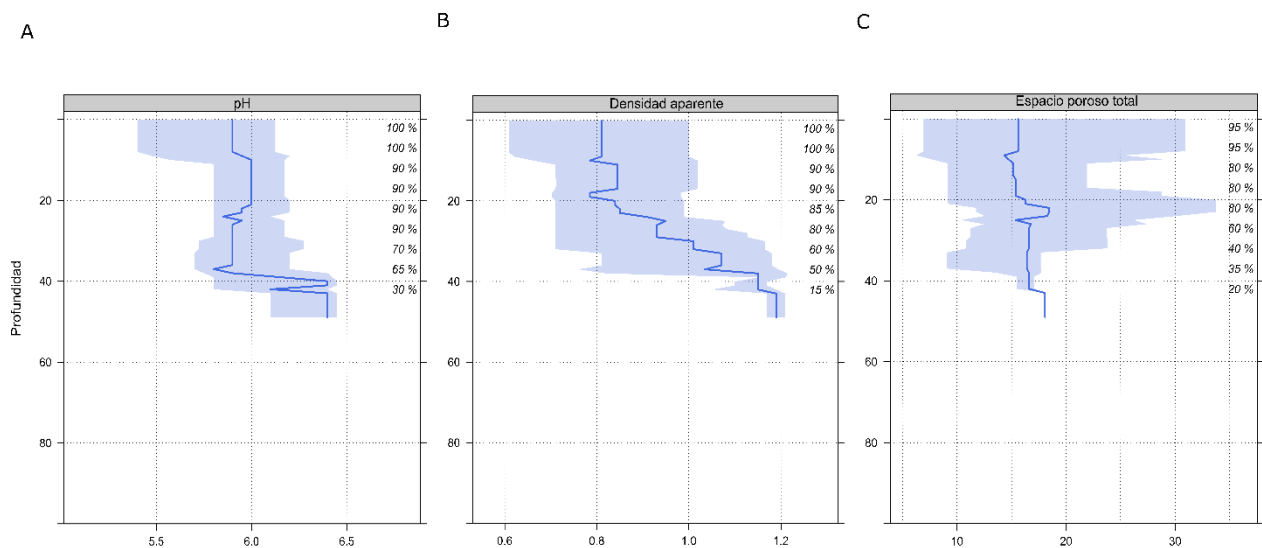


Figura 10. Comportamiento de las variables respecto a la profundidad. A) pH, B) Densidad aparente, C) Porosidad. La línea color azul indica la mediana.

La densidad aparente mostró valores más bajos en los primeros centímetros, y un aumento progresivo con la profundidad (Figura 10B). Este comportamiento de la densidad aparente respecto a la profundidad que se presentaron en los suelos de este estudio coincidió con el comportamiento en los suelos estudiados por Salamanca y Siavosh en el 2005 quienes evaluaron esta propiedad en suelos de Colombia, donde ellos establecieron que los cambios de densidad estuvieron asociados al contenido de materia orgánica, textura y uso y manejo suelo.

Por tanto, los horizontes superficiales con baja densidad aparente tienen menor compactación, mayor retención de humedad, mayor espacio poroso y una mejor aireación comparado con horizontes más profundos (Klein y Libardi, 2002) (Tabla 2) lo cual, potencialmente, favorece la movilidad de elementos a través del flujo del agua (Rodríguez et al., 2019).

La distribución del porcentaje de porosidad (Figura 10C) varió respecto a la profundidad, en general los primeros centímetros presentaron los porcentajes más bajos, a pesar de que algunos horizontes presentaron porcentajes altos. El espacio poroso total después de los 20 cm aumentó hasta los 30 cm. Los porcentajes bajos de porosidad en los primeros centímetros se relacionan con suelos destinados a la actividad agrícola debido a la actividad de labranza (Benjamin, 1993). Asimismo, el porcentaje alto de porosidad en los primeros centímetros se debe al contenido de materia orgánica (McGarry, 2003), a la cantidad de raíces en crecimiento y a la actividad de microfauna/macrofauna, la cual se desarrolla principalmente en los primeros centímetros (Konijnenburg, 2006). Por lo que una alta porosidad en los suelos permite un flujo rápido del agua y una mayor infiltración favoreciendo el movimiento de los elementos potencialmente tóxicos ya que pueden

traspasar con mayor facilidad los horizontes (Castellanos, 2000).

#### **4.1.1 Evaluación de la capacidad de amortiguamiento de los suelos**

La fuerza de enlace en los primeros 30 cm de los suelos en los elementos Fe<sup>(III)</sup>, Hg, Pb, Cr<sup>(III)</sup>, Cu, Al, Zn, Co, Ni, Mn, Cd, fue de alta y muy alta en el 91% de los horizontes. Con excepción de los horizontes Aco10-A y Aco11-C que presentaron una fuerza de enlace baja para los elementos Ni, Co y Zn (Figura 11).

El horizonte Aco15-B presentó una fuerza de enlace baja para los elementos Cd y Co, mientras que el horizonte Aco1-A presentó una fuerza de enlace baja para los elementos Co, Mn y Zn.

Sin embargo los horizontes que presentan baja y muy baja fuerza de enlace de los elementos Ni, Co, Cd, Mn y Zn se debe a los pH muy ácidos (Alloway, 2013) (Tabla 2), bajo contenido de materia orgánica y bajo contenido de arcillas, lo cual favorece su movilidad (Wirnkör y Ngozi, 2017); ya que la materia orgánica y arcillas actúan como absorbentes para los elementos potencialmente tóxicos (Kabata, 2004). Coincidiendo con lo encontrado por Varekamp y Buseck en 1983 quienes evaluaron los suelos de una zona geotérmica en EUA y aunque en este estudio no se evaluaron las variables que representan el Hg, se esperaría que de acuerdo a la especie química en la que se encuentre en el ambiente, dependerá si estas mismas propiedades influyan en su transporte y/o retención.

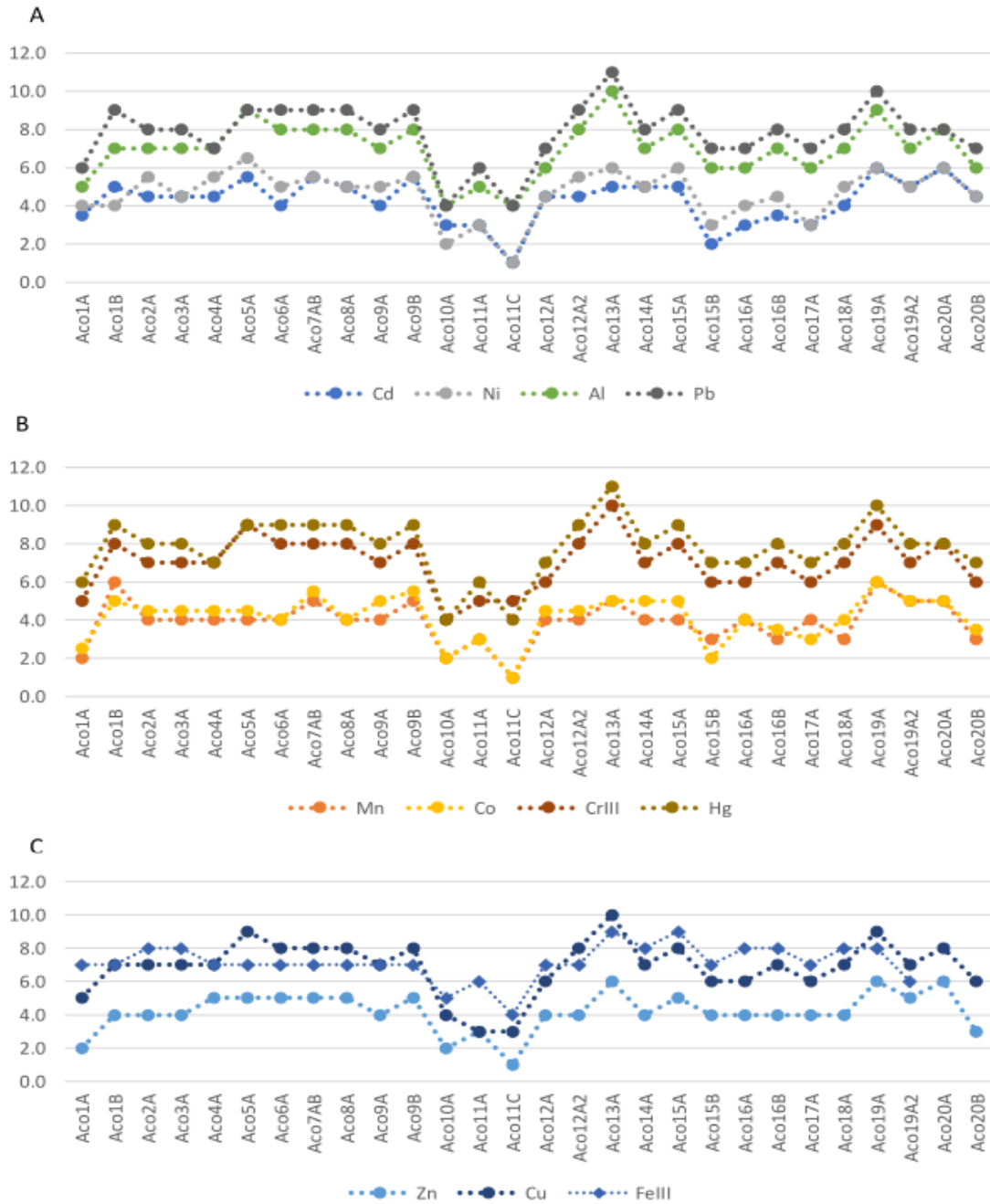


Figura 11. Evaluación de la fuerza de enlace de los horizontes respecto a los elementos

A) Cd, Ni, Al y Pb, B) Mn, Co, Cr<sup>III</sup> y Hg, C) Zn, Cu y Fe<sup>III</sup>

Fuerza de enlace	1	2	3	4	>5
Evaluación	muy baja	baja	media	alta	muy alta

Eje X : perfil y horizonte de suelos de Acoculco, Puebla.

Eje Y : valores de la fuerza de enlace.

## 4.2 Evaluación de la porosidad

En total se determinó la porosidad de treinta y ocho horizontes mediante láminas delgadas (Figura 12).

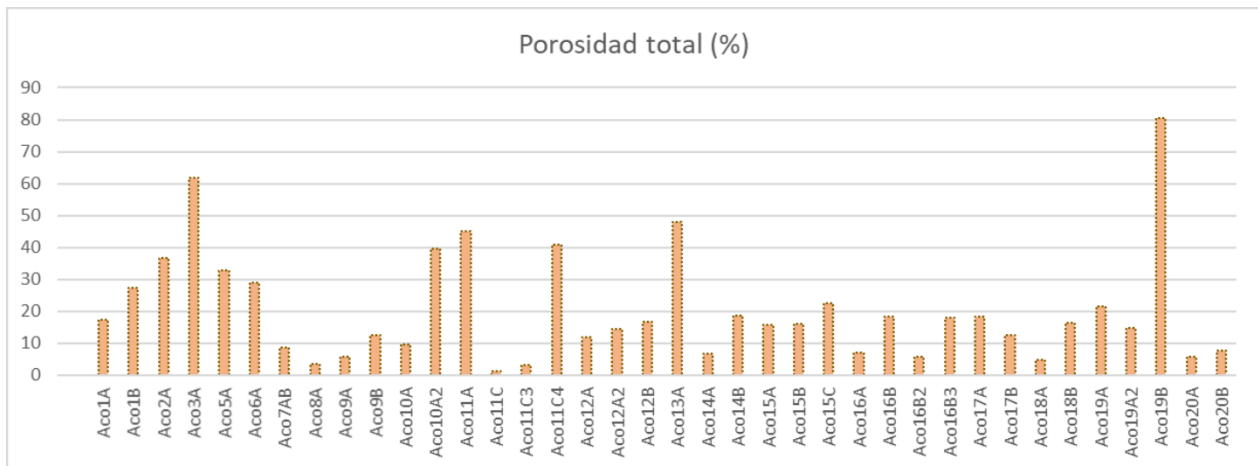


Figura12. Espacio poroso total (%) de cada horizonte.

El 68 % de los horizontes presentó una porosidad superior al 10 %, el horizonte Aco11-C presento la menor porosidad (1 %), mientras que los horizontes Aco3-A y Aco19-A2 presentaron la mayor porosidad (>60 %) (Figura 12 y 13).

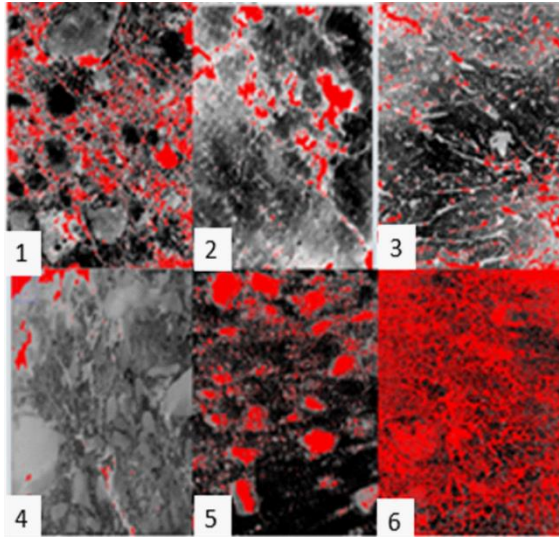


Figura 13. Fotografías de láminas delgadas representando la porosidad. 1 y 6) Muestran una porosidad alta correspondiente a los horizontes A del perfil Aco1 y el horizonte B del perfil Aco19. 2,3,4 y 5) Muestran una porosidad baja correspondiente a los horizontes AB del perfil Aco7, horizonte A del perfil Aco10, horizonte C del perfil Aco11 y horizonte B del perfil Aco15.

Los resultados muestran que los horizontes presentan una porosidad por debajo del mínimo ideal (<35 %) en suelos francos y en suelos arcillosos (<45 %). Por lo que estos horizontes presentan una deficiencia de aireación, mal drenaje y baja infiltración, favorecen que los elementos potencialmente tóxicos presenten dificultad para traspasar estos horizontes (Castellanos, 2000) sin embargo esto favorece el escurrimiento lateral o superficial (Beven, 2004).

Destacan algunos horizontes A, B y C con porosidad <10 % (Figura 11). Esto se debe al muy bajo contenido de materia orgánica, alta densidad aparente (Beltrán, 2018), y bajo contenido de rocas (Poesen y Lavee, 1994) (Tabla 2). La baja porosidad de los horizontes

con altos contenidos de materia orgánica es explicada por el bajo contenido de rocas y la alta densidad aparente (Buckman y Brady, 1977).

Los horizontes que presentan una porosidad ideal  $>50\%$  (Figura 11) se relacionan con el alto contenido de materia orgánica y a su densidad aparente muy baja (Beltrán, 2018). Con excepción de los horizontes Aco3-A y Aco13-A donde su densidad es alta y la alta porosidad que presentan se debe al tipo de textura, siendo franco arcillo arenosa en ambos horizontes (Buckman y Brady, 1966) lo cual favorece la movilidad de elementos a treves del flujo del agua (Rodríguez et al. 2019).

En cuanto a la clasificación (Figura 14), los poros de empaquetamiento representaron  $<2\%$ , los poros de fisura representaron  $<21\%$ , y los poros tubulares representaron más del  $70\%$  del espacio poroso total en todos los horizontes, coincidiendo con lo encontrado por Prado en el 2009, donde los suelos cultivados presentaban mayor cantidad de poros tubulares y aunque en este estudio no se contemplan usos de suelo natural, la mayor parte de los suelos en este estudio están destinados a la agricultura.

Sin embargo, los resultados de este estudio también son contrarios a lo encontrado por González Barrios en el 2012. Ellos encontraron una mayor proporción de macroporos en suelos de bosque y pastizal, mientras que nuestros resultados mostraron que existe mayor cantidad de microporos. En cuanto a suelos desnudos, ellos encontraron mayor proporción de microporos, esto coincide con nuestros resultados en suelos cultivados, aunque estos no son suelos desnudos todo el año, sí presentan una cobertura vegetal menor a la de los bosques o pastizal inducido del sitio.

El hecho de que todos los horizontes presentan mayor cantidad de poros tubulares indica que son suelos con alta retención de agua por lo que favorece la retención de elementos

potencialmente tóxicos dificultando su movilidad a través del flujo de agua (Bouma, 1991) (Tabla 2). La baja proporción de poros de fisura y empaquetamiento implica una dificultad en las plantas para poder acceder al agua contenida en los poros y por lo tanto favorecen, la inaccesibilidad de elementos potencialmente tóxicos (Tabla 2).

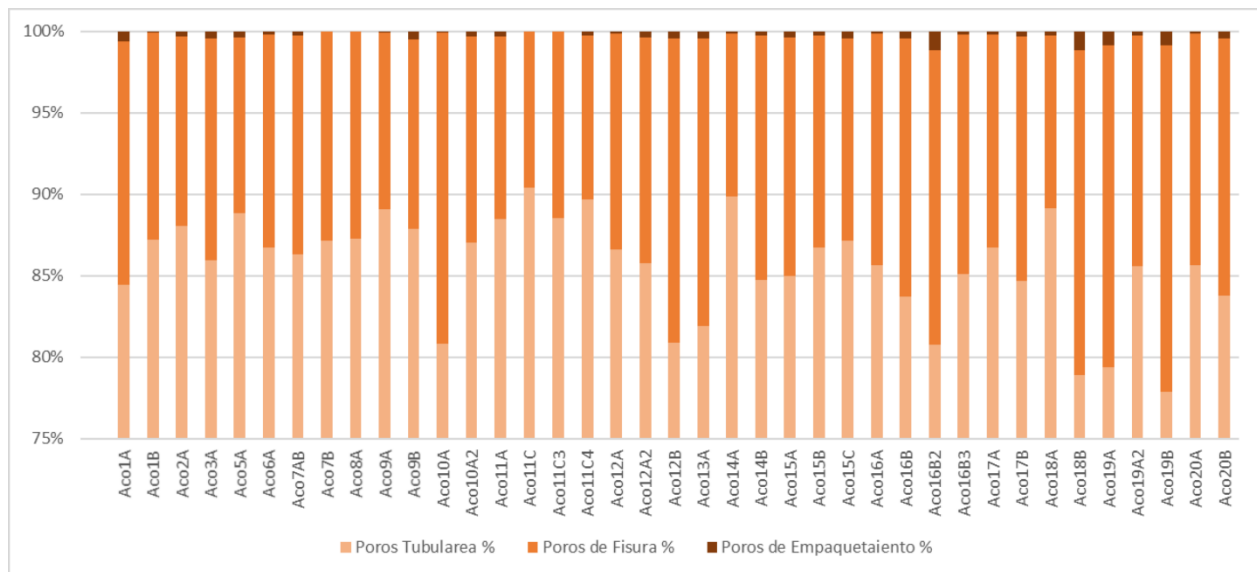


Figura 14. Tipos de poros (%) de cada horizonte.

### 4.3 Agrupación de los horizontes de acuerdo con las variables del suelo

La clasificación basada en las propiedades de transporte de los suelos (pH, contenido de materia orgánica, contenido de fragmentos rocoso, contenido de arcillas, densidad aparente, capacidad de agua disponible y capacidad de aireación) formó cinco grupos (Figura 15).

El primero se caracterizó por tener los valores de pH más ácidos (< 4), alto contenido de materia orgánica, bajo contenido de rocas (<35 %), densidad aparente baja (<1.2) y capacidad de aireación alta. El grupo dos se caracterizó por tener porcentaje bajos de

arcillas (<18 %), contenido de materia orgánica alto y capacidad de aireación alta. El grupo tres solo integró dos horizontes pertenecientes al perfil Aco17 caracterizado por tener contenido de rocas (>40 %) y arcillas (>50 %) altos, contenido de materia orgánica bajo (<2 %) y capacidad de aireación baja.

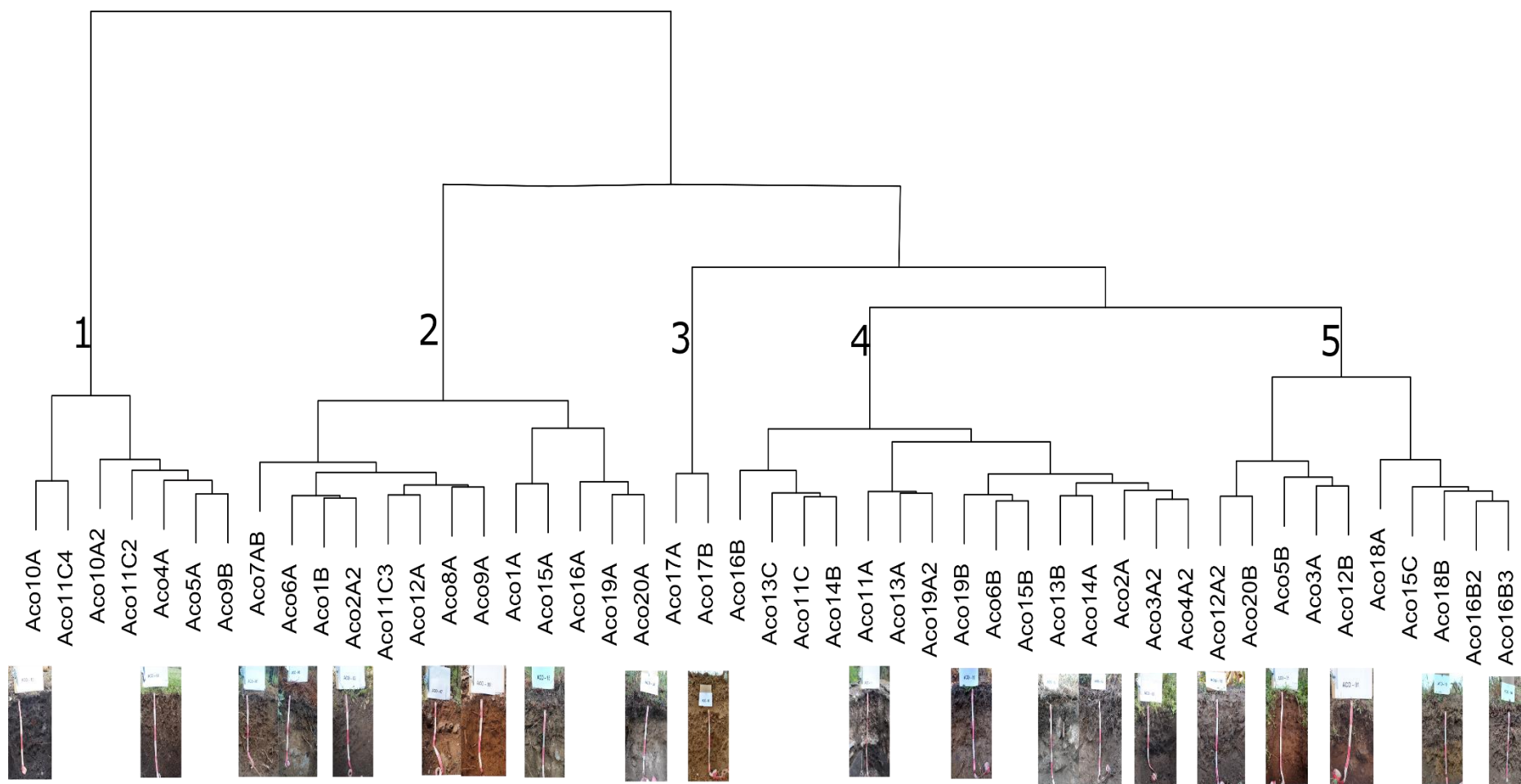


Figura 15. Clasificación de los horizontes de acuerdo con las variables de pH, contenido de materia orgánica, contenido de rocas, porcentaje de arcillas, densidad aparente, capacidad de agua disponible y capacidad de aireación.

El grupo cuatro se caracterizó por suelos con alto contenido de rocas alto (>35 %), contenido de materia orgánica bajo-alto, densidad aparente baja y capacidad de aireación baja. El grupo cinco se caracterizó por tener contenido de rocas <35 %, contenido de materia orgánica bajo (<5 %), densidad aparente alta (>1 %) y capacidad de aireación baja.

De acuerdo con los resultados de la agrupación aquellos horizontes que presentan las propiedades más favorables para el transporte de elementos potencialmente tóxicos son los horizontes del grupo uno y dos. Debido a que presentan pH muy ácido por lo que los elementos se pueden solubilizar en la solución del suelo, favoreciendo su movilidad (Baquy et al. 2018), bajo porcentaje de arcillas lo que disminuye la capacidad de absorción de estos horizontes (Balaban et al. 2017) y alta capacidad de aireación lo cual genera que los elementos potencialmente tóxicos disueltos en la solución del suelo que no fueron retenidos los pueden traspasar rápidamente (Rodríguez et al., 2019).

Los horizontes que presentan propiedades que favorecen la retención de elementos potencialmente tóxicos son los horizontes del grupo 4 y 5 debido a su contenido alto de arcillas y materia orgánica lo cual favorece la retención de elementos potencialmente tóxicos debido a la alta capacidad de adsorción (Balaban et al., 2017) y mayor cantidad de poros pequeños favoreciendo su retención en el espacio poroso (Rodríguez et al., 2019), presentan pH cercanos a la neutralidad evitando su solubilidad en la solución del suelo (Baquy et al., 2018) y baja capacidad de aireación dificultando su movilidad en el flujo de agua (Galán y Romero, 2008).

#### **4.4 Variables del suelo en función de los horizontes genéticos y la posición en el paisaje**

Los análisis mostraron que el contenido de arcilla fue mayor en los horizontes B con respecto a los horizontes A, AB y C (Figura 16A), esto se debe a los procesos de iluviación (Kleber, 2000) siendo horizontes que favorece la retención de elementos potencialmente tóxicos en relación con su capacidad de adsorción de las arcillas (Balaban et al., 2017); y la disminución en el tamaño de poros (Rodríguez et al., 2019) .

El horizonte C fue el único que mostró diferencias en el pH (muy ácidos) (Figura 16B) favoreciendo la movilidad de elementos potencialmente tóxicos ya que se pueden solubilizar en la solución del suelo (Baquy et al., 2018) y en la densidad aparente (bajas) (Figura 16C), lo cual, potencialmente, favorece la movilidad de elementos a través del flujo del agua (Rodríguez et al., 2019).

La cantidad de materia orgánica fue distinta en horizontes A, siendo más alta, esto se debe a que es donde se acumulan los restos animales y vegetales (Figura 16D) (Sánchez y Rubiano, 2015) favoreciendo la adsorción de los elementos potencialmente tóxicos o su inmovilización a través de la formación de complejos órgano-minerales (Medina et al., 2017; Klein y Libardi, 2002). La capacidad de agua disponible solo difirió en el horizonte AB donde fue menor (Figura 16E) evitando que elementos potencialmente tóxicos sean accesibles a las plantas (Bouma, 1991; Galán Huertos & Romero Baena, 2008). La capacidad de aireación entre los horizontes A y AB fue similar (alta), debido al contenido más alto de materia orgánica, que favorece el desarrollo de poros (Barry, 1999) lo cual, potencialmente, favorece la movilidad de elementos que no son retenidos a través del flujo del agua (Rodríguez et al., 2019), (Figura 16F). El espacio poroso total fue distinto

únicamente en el horizonte AB presentando un menor porcentaje (Figura 16G) favoreciendo que los elementos potencialmente tóxicos presenten dificultad para traspasar este horizonte (Castellanos, 2000) sin embargo incrementa el escurrimiento lateral o superficial (Beven, 2004).

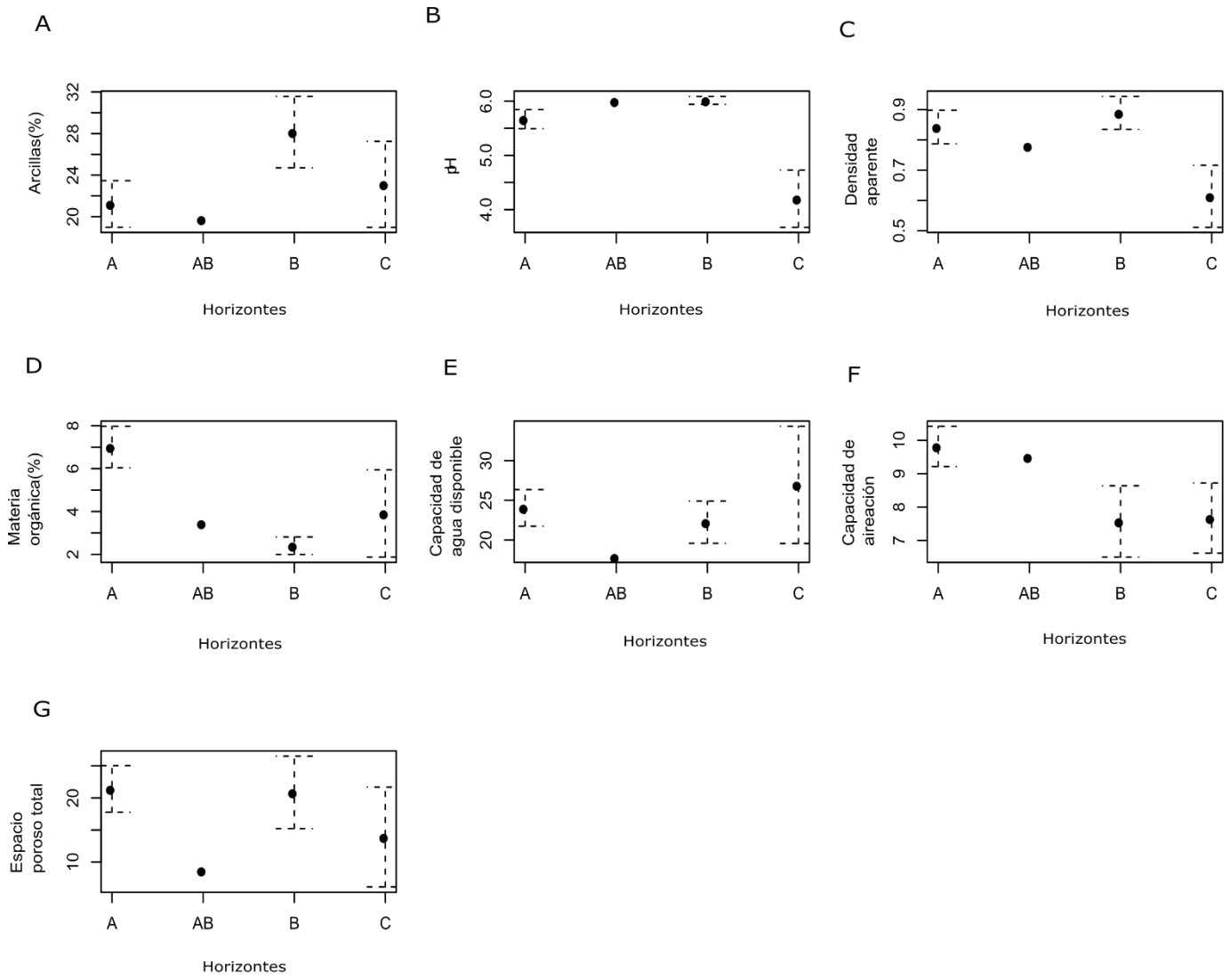


Figura 16. Gráficos de medias respecto al tipo de horizonte. A) Contenido de arcillas, B) pH, C) Densidad aparente, D) Materia orgánica, E) Capacidad de agua disponible, F) Capacidad de aireación, G) Espacio poroso total.

El uso del suelo de los horizontes superficiales mostró que el contenido de arcillas fue menor en la vegetación secundaria de pino y encino respecto a los demás usos (Figura 17A) (No se observa asociación por la clase textural) lo cual disminuye la capacidad de absorción de este horizonte y favorece la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos (Balaban et al., 2017; Chaperon y Sauvé, 2007). Los valores de pH no presentaron diferencias a excepción del bosque de pino, los cuales presentaron valores extremadamente ácidos (Figura 17B), presumiblemente debido al alto contenido de materia orgánica derivada del tipo de vegetación, generando mayor contenido de ácidos orgánicos (CHE e IGME 2014) y a la cercanía a una manifestación hidrotermal por lo que los gases desprendidos generan la acidificación de estos suelos (Mitchell y Soga, 2005), favoreciendo la solubilidad de elementos en la solución del suelo (Baquy et al., 2018).

La densidad aparente fue más alta en los suelos de agricultura de temporal anual y agricultura de temporal permanente respecto al resto de los usos de suelo (Figura 17C), esto se debe a la compactación causada por la actividad agrícola (González et al., 2009). Por lo que se favorecen a que los elementos potencialmente tóxicos presenten dificultad para traspasar estos horizontes por el mal drenaje y baja infiltración (Castellanos, 2000). El contenido de materia orgánica fue más alto en bosque de pino y vegetación secundaria de pino respecto al resto de usos de suelo (Figura 17D), ya que hay un mayor depósito de restos vegetales derivado del tipo de vegetación (Labrador et al., 1993) lo cual

favorece la adsorción o inmovilización de elementos potencialmente tóxicos (Medina et al., 2017; Klein y Libardi, 2002).

La capacidad de agua disponible fue distinta en la vegetación secundaria de pino respecto al resto, donde se presentan los valores más bajos (Figura 17E) favoreciendo a que los elementos potencialmente retenidos en el espacio poroso no seas accesibles a las plantas (Bouma, 1991; Galán Huertos & Romero Baena, 2008). La capacidad de aireación mostró que el pastizal inducido difirió con el resto de los usos del suelo, siendo el más bajo (Figura 17F) por lo que son horizontes donde los elementos presentan dificultad para traspasarlos (Rodríguez et al., 2019).

El espacio poroso total mostró que la agricultura de temporal anual y el bosque de pino presentaron mayor espacio poroso por lo que estos horizontes favorecen a que elementos potencialmente tóxicos no retenidos los traspasen con facilidad ya que presentan mayor drenaje e infiltración, (Castellanos, 2000).

En cuanto a las diferencias de los horizontes superficiales respecto al tipo de relieve y la inclinación de la pendiente éstas son dadas por el uso de suelo.

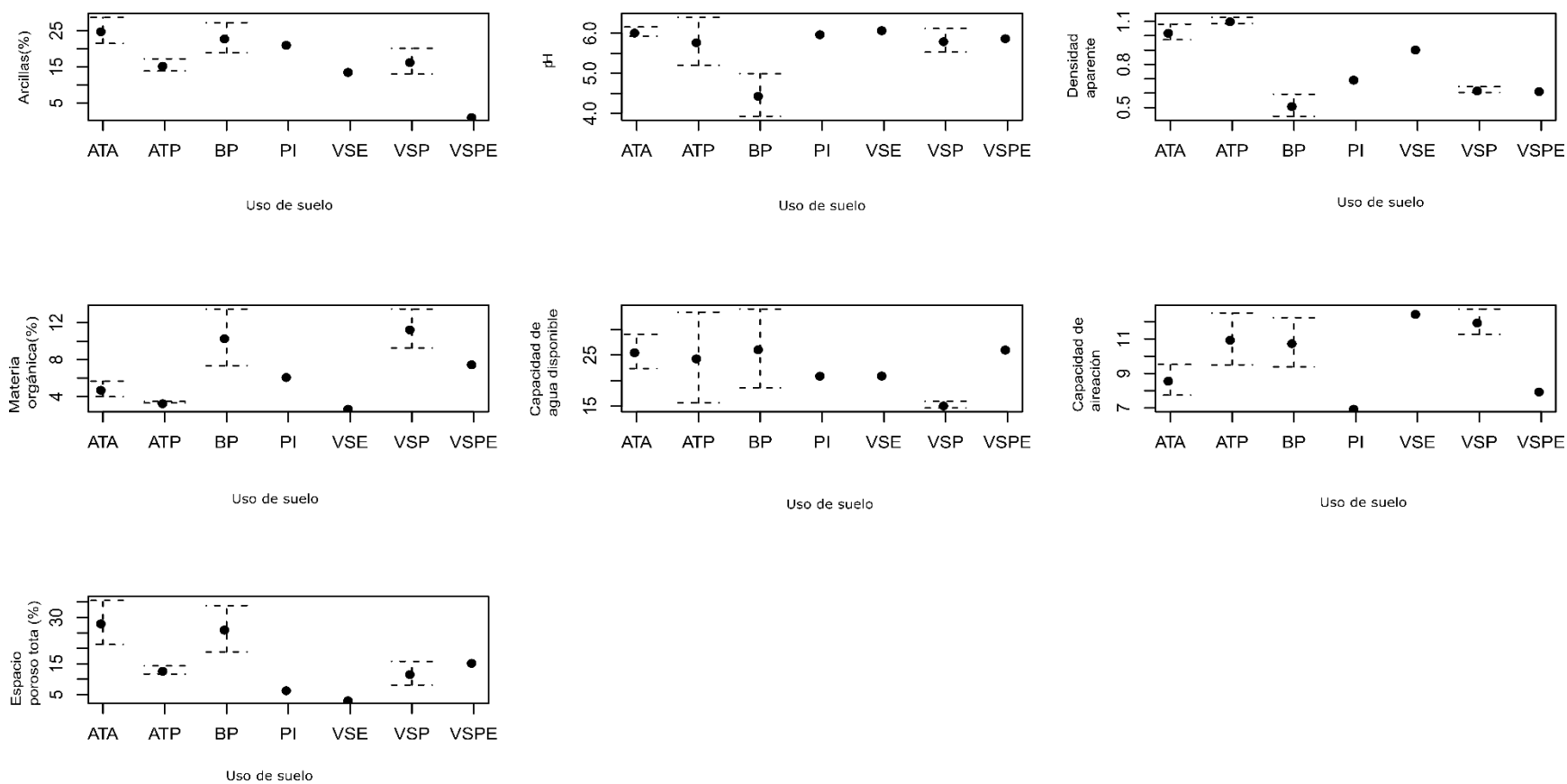


Figura 17. Gráficos de medias respecto al uso de suelo de los horizontes superficiales. A) Contenido de arcillas, B) pH, C) Densidad aparente, D) Materia orgánica, E) Capacidad de agua disponible, F) Capacidad de aireación, G) Espacio poroso total.

Donde: ATA Agricultura de temporal anual, ATP Agricultura de temporal permanente, BP Bosque de pino, PI Pastizal inducido, VSE Vegetación secundaria de encino, VSP Vegetación secundaria de pino, VSPE Vegetación secundaria de pino-encino.

#### **4.5 Relaciones estadísticas de las variables del suelo**

El análisis de correlación mostro que la materia orgánica se relacionó positivamente con la capacidad de aireación (Rho valor,  $p < 0.5$ ) (Figura 18), ya que cuando aumenta la materia orgánica hay un aumento del espacio poroso mejorando la capacidad de aireación. En el caso contrario, cuando la materia orgánica disminuye, el espacio poroso y la capacidad de aireación se reduce (Castellanos, 2000).

La capacidad de aireación se relacionó negativamente con el contenido de arcillas (Rho valor,  $p < -0.75$ ) ya que si aumenta el contenido de arcillas disminuye la capacidad de aireación ya que se generan mayor cantidad de microporos, provocando mayor retención de agua y una dificultad para su movimiento a través del suelo. En el caso en el que se presente bajo contenido de arcillas, se generan poros más grandes y hay mejor drenaje del agua y aireación (Besoain, 1985).

El pH se relacionó con la densidad aparente positivamente (Rho valor,  $p < 0.5$ ), esta relación se analiza desde la perspectiva del contenido de materia orgánica, ya que si aumenta el contenido de materia orgánica disminuye la densidad aparente y el pH es más ácido (Ji, 2014), en el caso contrario la densidad aparente tendería a aumentar y el pH sería menos ácido.

La relación de la materia orgánica y la densidad aparente es positiva (Rho valor,  $p < 0.5$ ) cuando aumenta el contenido de materia orgánica se generan más espaciosos porosos y esto ocasiona una disminución de la densidad aparente (Salamanca y Siavosh, 2005).

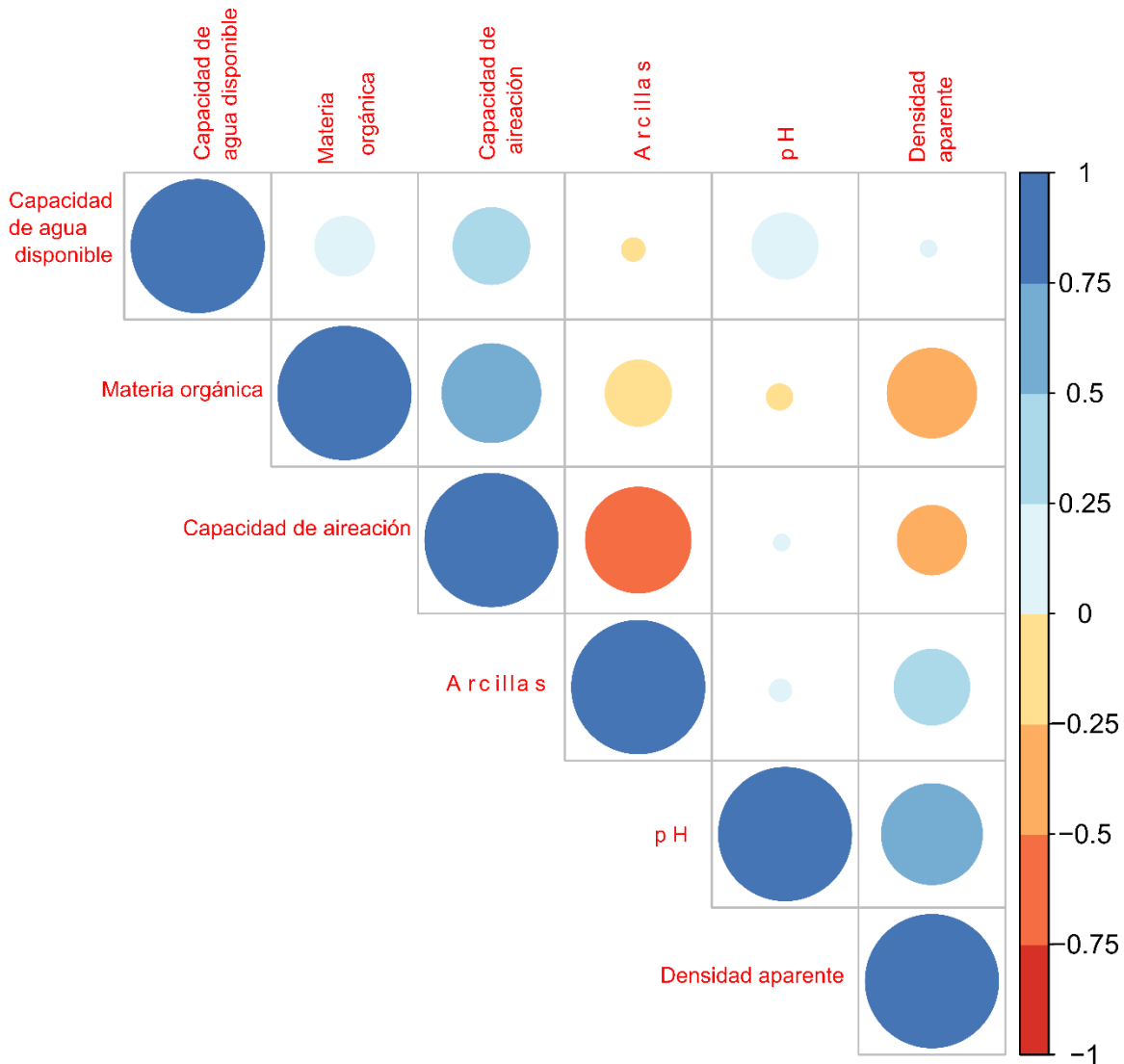


Figura 18. Correlación de Spearman de las variables asociadas al movimiento y/o transporte de elementos potencialmente tóxicos. El tamaño del círculo corresponde al valor de la correlación cuanto mayor sea el círculo mayor es la correlación. El color indica el sentido de la correlación, el color azul indica una correlación positiva y el color amarillo, naranja y rojo indican una correlación negativa.

Variable	Efecto sobre la movilidad	Referencia
Fragmentos rocosos (%)	Aumenta la infiltración del agua, generando un flujo más rápido a una mayor profundidad.	(Poesen y Lavee, 1994)
Textura %	Texturas arcillosas: generan una baja permeabilidad y mayor retención de agua.  Texturas arenosas: presentan mayor permeabilidad, drenaje alto y baja retención del agua.	(Corpoica, 2000)
Contenido de materia orgánica	Actúa como adsorbente para elementos disueltos en la solución del suelo y aumenta la retención de agua.	(Chaperon y Sauvé, 2007)(Medina et al., 2017)
pH	La acidez genera solubilidad de elementos en la soluci3n del suelo, generando su potencial movilizaci3n.	(Alloway, 2013)(Baquy et al., 2018)
Densidad aparente	Densidades bajas generan una mayor retenci3n de elemento traza en la soluci3n del suelo debido a su drenaje deficiente.	(Klein y Libardi, 2002)
Arcillas (%)	Actúan como adsorbentes para aniones por su carga negativa, evitando su movilidad.	(Balaban et al., 2017)
Capacidad de aireaci3n	Una alta capacidad genera que elementos de la soluci3n del suelo lo traspasen rápidamente y no sean retenidos.	(Rodríguez et al., 2019)
Capacidad de agua disponible	Elementos que se encuentran en la soluci3n del suelo se pueden encontrar biodisponibles para los organismos.	(Bouma, 1991)(Gal�n y Romero, 2008)
Porosidad	Una alta porosidad permite un flujo rápido del agua y una mayor infiltraci3n.	(Castellanos, 2000)
Poros tubulares	Generan una alta retenci3n del agua por sus tamaños pequeños, el agua retenida es inaccesible para las plantas.	(Bouma, 1991)
Poros de fisura	El agua contenida en ellos se encuentra accesible a las plantas, por lo que los elementos disueltos en la soluci3n del suelo podrían estar disponibles a través del agua.	(Bouma, 1991)(Gal�n y Romero, 2008)
Poros de empaquetamiento	Generan un aumento del flujo de agua, infiltraci3n y poca retenci3n de agua.	(Bouma, 1991)

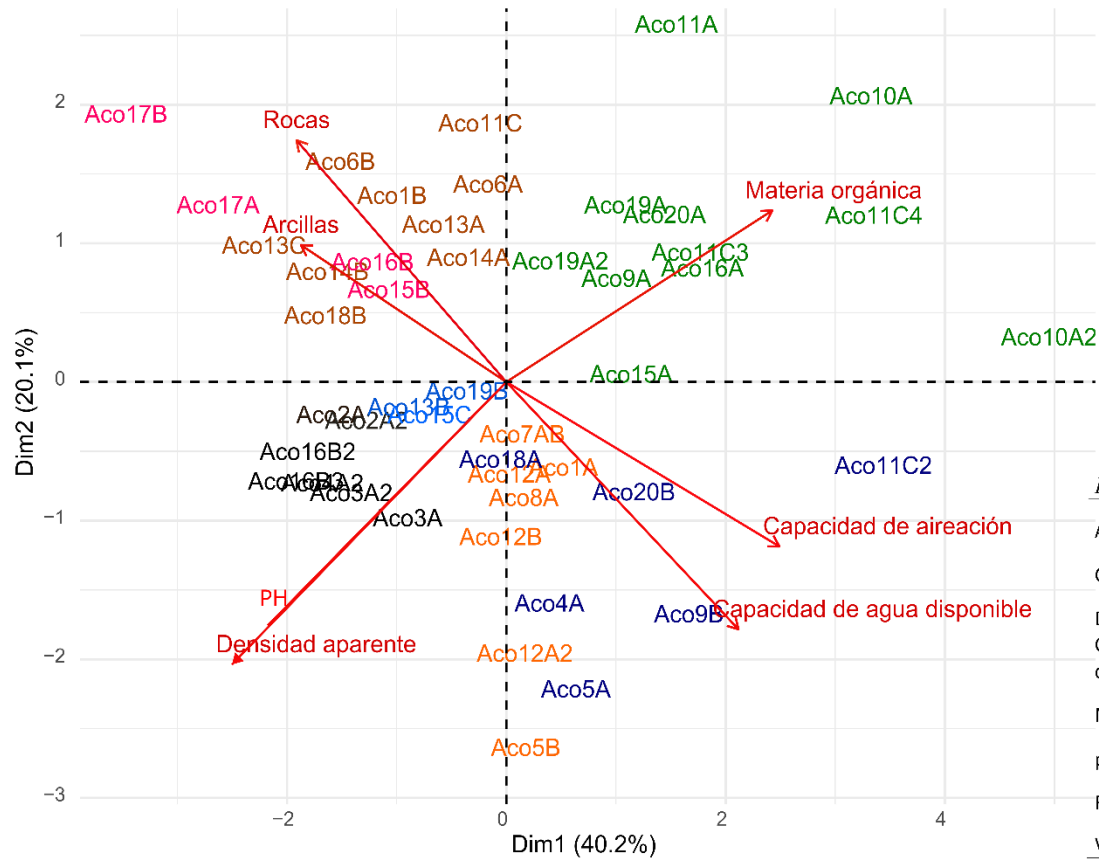
Tabla 2. Variables asociadas al movimiento/transporte de elementos potencialmente tóxicos y su efecto en el suelo.

El análisis de componentes principales (PCA; Figura 19) presentó una varianza acumulada del 60 %. En el eje uno explica el 40 % de variación de los datos, los componentes principales de este eje forman un gradiente basado en el contenido de materia orgánica, la capacidad de aireación, el contenido de arcillas y la densidad aparente (Tabla 19). Los horizontes con mayor contenido de materia orgánica (parte superior derecha) tienen una mayor retención de iones ya que, de acuerdo con López et al., (2019) proveen al suelo de superficies con carga que favorecen la adsorción de elementos potencialmente tóxicos, evitando su movilización (Tabla 2). Sin embargo, ya que se relaciona con una baja densidad aparente y una alta capacidad de aireación, los horizontes presentarían buen drenaje (Jaramillo, 2002), lo que podría favorecer la movilidad de los elementos no adsorbidos (en suspensión) (Reyna et al., 2014). En el otro extremo de este gradiente, se observan los horizontes que tienen un mayor contenido de arcillas (Figura 19) y con mayor densidad aparente (parte inferior izquierda), los cuales favorecen que los elementos potencialmente tóxicos presenten dificultad para atravesar estos horizontes, ya sea por la adsorción y retención de elementos en las superficies de las arcillas (López-Báez et al., 2019), o debido a que, como explica Torres (2014) estas condiciones generan deficiencias de drenaje, sin embargo, esto puede favorecer escurrimiento lateral o superficial (Beven, 2004) .

El segundo eje del PCA (20 % varianza) genera un gradiente relacionado con el pH, así como de retención de agua y pedregosidad en los horizontes de suelo (Tabla 19). Los horizontes con alta capacidad de agua disponible (parte inferior derecha) favorecen,

potencialmente, la accesibilidad de elementos potencialmente tóxicos a las plantas (Tabla 2). En el otro extremo del gradiente, los horizontes con mayor contenido de fragmentos rocosos (parte superior izquierda) favorecen el movimiento de elementos potencialmente tóxicos debido a que presentan mayor infiltración y poca retención de estos en el espacio poroso, de acuerdo con Úbeda et al., (2018) esto generan que los elementos traspasen con mayor facilidad a horizontes más profundos (Tabla 2).

A



B

Propiedades del suelo	Eje 1	Eje 2
Arcillas (%)	-0.60***	0.20
Capacidad de aireación	0.79***	-0.33
Densidad aparente	-0.65***	-0.59***
Capacidad de agua disponible	0.41	-0.60***
Materia orgánica (%)	0.64***	0.14
pH	-0.27	-0.64***
Rocas (%)	-0.44	0.51*
Varianza acumulada (%)	40.2	60.2

Figura 19.A) Análisis de componentes principales (PCA) de las variables asociadas al transporte y/o movimiento de elementos potencialmente tóxicos. El color verde indica los horizontes con mayor contenido de materia orgánica, el azul intenso los de mayor capacidad de agua disponible, los naranjas los de mayor capacidad de aireación, el color negro los de mayor densidad aparente, azul claro los de pH cercanos a la neutralidad, los de color marrón presentan mayor contenido de fragmentos rocosos y los rosas contienen mayor cantidad de arcillas. B) Tabla de correlación de las variables respecto a los ejes del análisis de componentes principales (PCA). Los \* indican las variables significativas en la correlación.

#### **4.6 Similitud estadística entre horizontes y uso de suelo**

El análisis factorial de datos mixtos (FMDA) (Figura 20) permitió identificar tres grupos cuando se integra el tipo de horizonte al análisis (Figura 20A). El primer grupo se conforma por horizontes A y B, con alta capacidad de aireación, lo cual, potencialmente, favorece la movilidad de elementos a treves del flujo del agua (Rodríguez et al., 2019), sin embargo, estos horizontes presentan pH cercanos a la neutralidad y alto contenido de materia orgánica, lo cual favorece su adsorción en el complejo de intercambio o su inmovilización a través de la formación de complejos órgano-minerales (Medina et al., 2017; Klein y Libardi, 2002).

El grupo dos está formado por horizontes que presentaron alto contenido de arcillas y baja capacidad de aireación, esto favorece la retención de elementos potencialmente tóxicos en relación con: a) la capacidad de adsorción de las arcillas (Balaban et al., 2017); b) la disminución en el tamaño de poros (Rodríguez et al., 2019) y debido a que: c) los pH de estos horizontes son cercanos a la neutralidad, evita que los elemento se

solubilicen en la solución del suelo, lo que disminuye su movilidad entre horizontes (Baquy et al., 2018).

El grupo tres integro únicamente horizontes C. estos horizontes presenta bajo contenido de arcillas y materia orgánica, lo que disminuye la capacidad de absorción de estos horizontes y favorece la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos (Balaban et al., 2017) (Chaperon y Sauvé, 2007), simultáneamente, estos horizontes presentaron pH extremadamente ácidos por lo que los elementos se pueden solubilizar en la solución del suelo, favoreciendo su movilidad (Baquy et al., 2018), adicionalmente, la capacidad de aireación fue intermedia/alta por lo que son horizontes donde los elementos que no sean retenidos pueden traspasarlos sin dificultad (Rodríguez et al., 2019).

El (FMDA) (Figura 20) permitió identificar cuatro grupos cuando se integra el tipo de uso de suelo (Figura 20B). El primer grupo consta de horizontes con bajo contenido de arcilla, lo cual disminuye la capacidad de absorción de estos horizontes y favorece la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos (Balaban et al., 2017 ;Chaperon y Sauvé, 2007), los horizontes de suelo de este grupo presentan alta capacidad de aireación, lo cual, podría favorecer la movilidad de elementos a treves del flujo del agua (Rodríguez et al., 2019), no obstante presentan alto contenido de materia orgánica lo cual favorece su adsorción o su inmovilización a través de la formación de complejos órgano-minerales (Medina et al., 2017; Klein y Libardi, 2002).

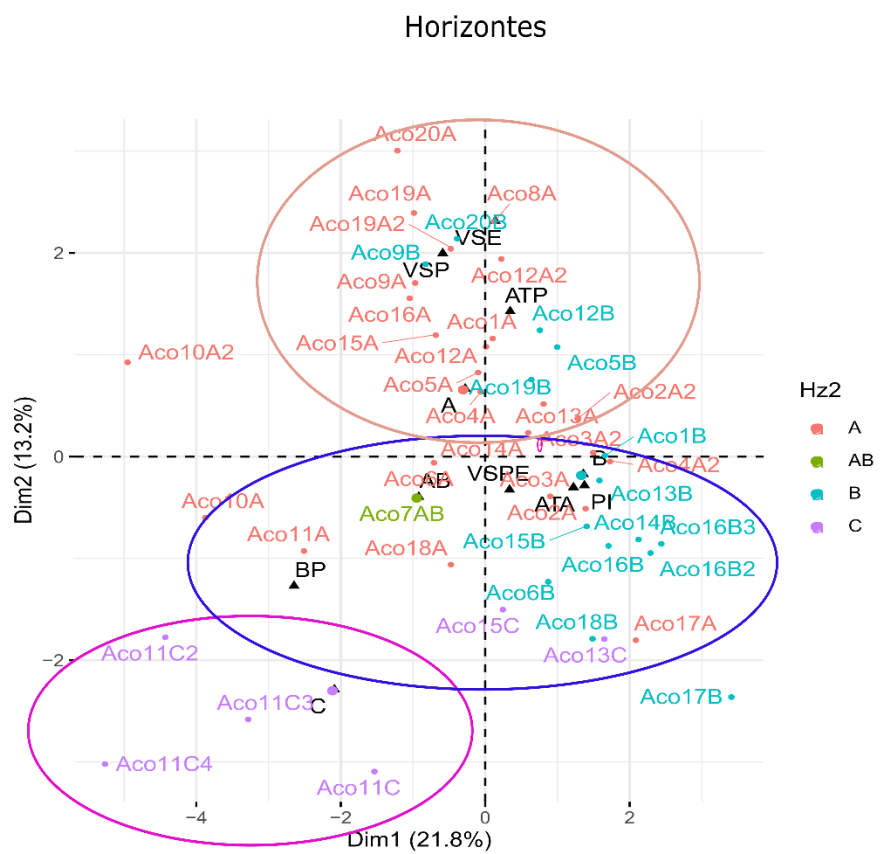
El grupo dos está formado por horizontes que presentaron bajo contenido de arcilla y materia orgánica lo que disminuye la capacidad de absorción de estos horizontes y favorece la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos (Balaban et al., 2017; Chaperon y Sauvé, 2007) la capacidad de aireación fue alta por lo que son horizontes

donde los elementos que no sean adsorbidos por las arcillas o materia orgánica pueden traspasarlos sin dificultad (Rodríguez et al., 2019).

El grupo tres integro horizontes que presentaron alto contenido de arcillas esto favorece la retención de elementos potencialmente tóxicos en relación con: a) la capacidad de adsorción de las arcillas (Balaban et al., 2017); b) la disminución en el tamaño de poros (Rodríguez et al., 2019), la capacidad de aireación fue baja por lo que son horizontes donde los elementos presentan dificultad para traspasarlos (Rodríguez et al., 2019).

El grupo cuatro integro suelos de bosque de pino, aunque hay alta variación en cuanto al contenido de materia orgánica, estos suelos tienden a formar compuestos orgánicos complejos que favorecen la adsorción de los elementos en el complejo de intercambio o su inmovilización a través de la formación de complejos órgano-minerales (Medina et al., 2017; Klein y Libardi, 2002). Un punto de atención en estos suelos, es la cercanía a una manifestación hidrotermal por lo que son horizontes que se están acidificando debido a los gases desprendidos (Mitchell y Soga, 2005) por lo que sus pH extremadamente ácidos, favorecen la movilidad de elementos potencialmente tóxicos ya que aumenta su solubilidad (Baquy et al., 2018) presentan una capacidad de aireación alta por lo que los elementos que no puedan ser retenidos traspasaran con facilidad los horizontes (Rodríguez et al., 2019).

A



B

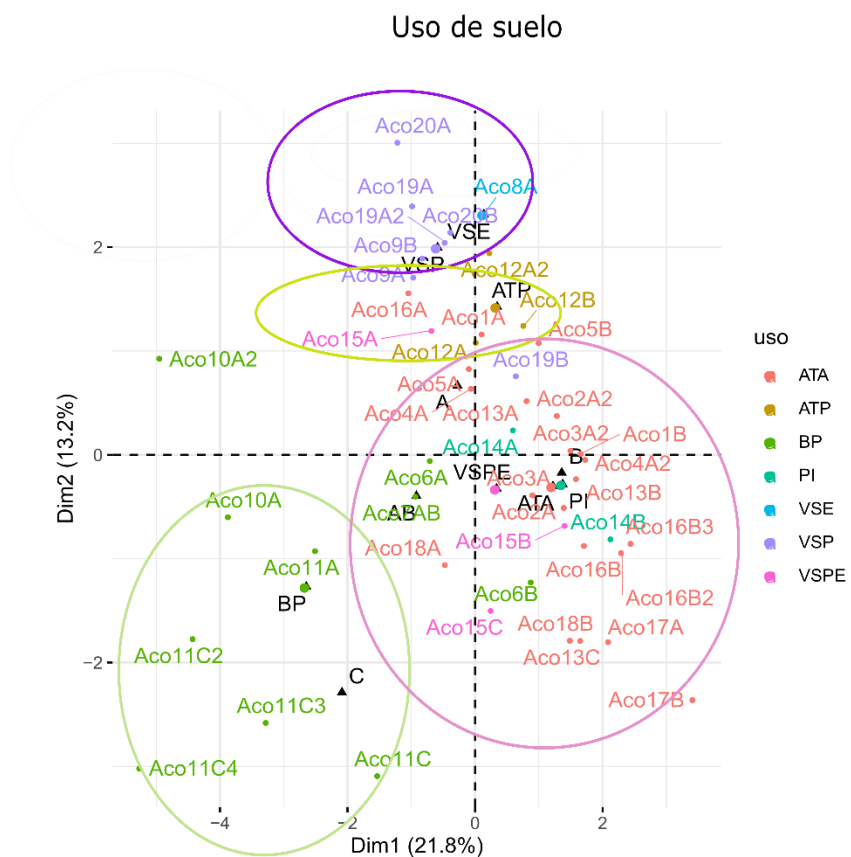


Figura 20. Análisis factorial de datos mixtos (FAMD) de las variables asociadas al transporte y/o movimiento de elementos potencialmente tóxicos. A) Factor por horizonte genético. Círculo rosa grupo uno, círculo azul grupo dos y círculo morado grupo tres. B) Factor por uso de suelo donde ATA es agricultura de temporal anual, ATP agricultura de temporal permanente, BP bosque de pino, PI pastizal inducido, VSE vegetación secundaria de encino, VSP vegetación secundaria de pino, VSPE, vegetación secundaria de pino-encino. Círculo lila grupo uno, círculo amarillo grupo dos, círculo morado grupo tres y círculo verde grupo cuatro.

## 6 Conclusiones

Los suelos de Acoculco, Puebla presentan alta capacidad de retención de elementos potencialmente tóxicos en su espacio poroso, sin embargo, su baja permeabilidad e infiltración favorece el movimiento de los elementos a lo largo de la superficie del suelo.

El muestreo por horizonte es relevante en este estudio y sus diferencias son dadas por el uso del suelo al que están sometidos.

Los horizontes que presenten alto contenido de arcillas y materia orgánica, pH cercanos a la neutralidad, baja capacidad de aireación, baja capacidad de agua disponible, bajo contenido de fragmentos tendrán alta capacidad de retención de elementos potencialmente tóxicos en los suelos.

Los horizontes B presentan propiedades que favorecen la mayor retención de elemento potencialmente tóxicos mientras que los horizontes C presentan propiedades que favorecen mayormente su movilidad.

Los horizontes de vegetación secundaria de pino presentan las propiedades que favorecen la mayor retención de elemento potencialmente tóxicos mientras que Los horizontes de uso agrícola y bosque de pino presentan propiedades que favorecen mayormente su movilidad.

Los perfiles Aco10 y Aco11 son los únicos que presentan una acidificación en su horizonte causado por la actividad hidrotermal.

## 7 Referencias

- Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils, trace metals and metalloids in soils and their Bioavailability (3ra Ed, Vol. 114, Issue 11, pp. 1679–1680).
- Avendaño Cortés, J. (2017). Modelo térmico y de conductividad eléctrica en la caldera Tulancingo-Acoculco, Puebla (Tesis de maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Balaban, T. Ö., Bülbül, A., & Tarcan, G. (2017). Review of water and soil contamination in and around Salihli geothermal field (Manisa, Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 10(23).
- Baqay, M. A. Al, Li, J. Y., Jiang, J., Mehmood, K., Shi, R. Y., & Xu, R. K. (2018). Critical pH and exchangeable Al of four acidic soils derived from different parent materials for maize crops. *Journal of Soils and Sediments*, 18(4), 1490–1499.
- Barry, A. N. (1999). Soil biological, chemical, and physical dynamics during transition to non-thermal residue grass-seed management systems.(Tesis de licenciatura). Oregon State University.
- Beaudette, D. E., Roudier, P., & O'Geen, A. T. (2022). Algorithms for quantitative pedology. In *Computers and Geosciences* (Vol. 52, pp. 258–268).
- Bear, F. (1969). *Chemistry of the soil*. American Chemical Society. Monograph Series. Van Nostrand Reinhold.
- Beltrán, J. (2018). Propiedades físicas de los suelos, un recurso natural prestador de servicios biológicos y ambientales. Universidad Autónoma de Sinaloa - UAS, March, 8.
- Beven, K. 2004. Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes. *Hydrological Processes* 18: 3447-3460. doi: 10.1002/hyp.5740.
- Benjamin, J. G. (1993). Tillage effects on near-surface soil hydraulic properties. *Soil and Tillage Research*, 26(4), 277–288.
- Bert, H. (2011). Evaluación de la energía geotérmica en México Particularidades de las

- tecnologías para generación con energías renovables. Inter American Development Bank 41.
- Besoain, E. (1985). Mineralogía de arcillas de suelo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Bouma, J. (1991). Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, 46(C), 1–37.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117.
- Buol S., Hole F.D., McCracken R.J. 1989. Soil genesis and classification. 3a ed. Iowa State University Press, Ames. USA. 446 p
- C.Siebe, Jahn, R., & Stahr, K. (2006). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Instituto de Geología, Universidad Autónoma de México.
- Castellanos, J. Z. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. In México: Instituto de Capacitación para la productividad agrícola (p. 212).
- Ceballos, D., Hernández, O., & Vélez, J. (2009). Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas en un andisol del departamento de Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 27(1), 40–48.
- Chaperon, S., & Sauvé, S. (2007). Toxicity interaction of metals (Ag, Cu, Hg, Zn) to urease and dehydrogenase activities in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(9), 2329–2338.
- CONAGUA. (2017). Datos de la estación 13132 El Tepozan. Inventario de registros por década Año. In SEMARNAT (p. 14).
- CHE e IGME (2014): Análisis del impacto térmico generado por los pozos de climatización en las aguas subterráneas de la ciudad de Zaragoza. Convenio específico de colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Ebro y el Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Ministerio de Economía y Competitividad, Gobierno de España.

1309pp.

- Díaz-hinojosa, V. (2017). Estudio de evaluación ambiental del campo geotérmico Cerro Prieto , en Mexicali , Baja California . fase IV. Universidad Nacional Autónoma De México programa universitario de estrategias para la Sustentabilidad.
- Durowoju, O. S., Odiyo, J. O., & Ekosse, G. I. E. (2016). Variations of heavy metals from geothermal spring to surrounding soil and *Mangifera indica*-Siloam village, Limpopo Province. *Sustainability (Switzerland)*, 8(1), 1–12.
- Flores, L., & Alcalá, J. (2010). Manual de procedimientos analíticos física de suelos. Instituto de Geología (UNAM), 56.
- G. M. Siqueira, R. Vieira, Z.M. Souza, J. Dafonte, A. P. (2007). Utilización de herramientas estadísticas y geoestadísticas para optimización del muestreo de propiedades físicas del suelo. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo (Vol. 8, Issue December 2016)*.
- Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla*, 10, 48–60.
- González-Acevedo, Z. I., García-Zarate, M. A., Núñez-Zarco, E. A., & Anda-Martín, B. I. (2018). Heavy metal sources and anthropogenic enrichment in the environment around the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico. *Geothermics*, 72(November 2017), 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.11.004>
- Gómez Giraldo, J. C. (2013). Manual de Prácticas de Campo y del Laboratorio de Suelos. Servicio Nacional de Aprendizaje, 100.
- González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G., & Chávez-Ramírez, E. (2012). Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alta del río Nazas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, III(1), 21–32.
- González, O., Iglesias, C., & Herrera, M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18, 57–63.
- Gonzalezález, Z. I. (2017). La sustentabilidad de la energía geotérmica y sus impactos

ambientales. *Innovación Y Desarrollo Tecnológico. Revista Digital*, 9(2007–4786), 137–141.

Gutiérrez, J., González-Partida, E. (2016). *Procesos geológicos del campo geotérmico de Acoculco, Puebla, México. Tlamati Sabiduría*, 2.

Hiriart, G., Gutiérrez, L., Quijano, J., Ornelas, A., Espíndola, S., Hernández, I., (2011). *Evaluación de la energía geotérmica en México. Comisión Reguladora de Energía*

Huaman, J. L. (2016). *Evaluación de la capacidad de infiltración por precipitaciones, utilizando infiltrómetro de doble anillo en la zona de recarga hídrica de la unidad hidrográfica de Rontoccocha-Abancay, 2016. In Universidad Tecnológica de los Andares.*

INEGI. (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1000000. Unidades Climáticas.*

INEGI. (2017). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000 serie VI. Conjunto Nacional.*

INEGI, I. N. de E. y G. (1984). *Conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica E14B13. Serie I.*

J. González-Barrios, Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., & Valenzuela-Núñez, L. M. (2011). *Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. Terra Latinoamericana*, 29(4), 369–377.

Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia*. 613 p.

Ji, C. J., Yang, Y. H., Han, W. X., He, Y. F., Smith, J., & Smith, P. (2014). *Climatic and edaphic controls on soil pH in Alpine Grasslands on the Tibetan Plateau, China: a quantitative analysis. Pedosphere*, 24(1), 39–44.

Kabata-Pendias, A. (2004). *Soil-plant transfer of trace elements an environmental issue. Geoderma*, 122(2-4 SPEC. IIS.), 143–149.

Kassambara, A. (2004). *Practical guide to principal component methods in R (1st ed.)*. In STHDA

Kassambara, A. (2017). *R Graphics essentials for great data visualization. In STHDA*

(Vol. 53, Issue 9).

- Kleber, A. (2000). Compound soil horizons with mixed calcic and argillic properties - Examples from the northern Great Basin, USA. *Catena*, 41(1–3), 111–131.
- Klein, V., & Libardi, P. (2002). Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 26(4), 857–867.
- Konijnenburg, A. (2006). Agricultura orgánica El suelo: sus componentes físicos. In *Estacion Experimental Agropecuaria* (Vol. 1).
- Labrador, J., Guiberteau, A., Luis, L., & Reyes, J. (1993). La materia orgánica en los sistemas agrícolas. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid-España, 3(93), 1–44.
- Leal-Acosta, M. L., Shumilin, E., Mirlean, N., Sapozhnikov, D., & Gordeev, V. (2010). Arsenic and mercury contamination of sediments of geothermal springs, mangrove lagoon and the santispac bight, Bahía Concepción, Baja California peninsula. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 85(6), 609–613.
- López Báez, W., R. Reynoso-Santos, J. López-Martínez, B. Villar-Sánchez, R. Camas-Gómez y J. García-Santiago. (2019). Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 10: 897-910.
- López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., & Quijano-León, J. L. (2009). Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acocolco Caldera Complex, central Mexico: Exploratory studies. *Geothermics*, 38(3), 279–293.
- McGarry, W. E. and D. (2003). Organic carbon and soil porosity (pp. 107–118).
- Medina Méndez, J., Volke Haller, V., Galvis Spínola, A., Cortés Flores, J. I., & Santiago Cruz, M. D. J. (2017). Incremento de la materia orgánica del suelo y rendimiento de mango en Luvisoles, Campeche, México. *Agronomía Mesoamericana*, 28(2), 499.
- Mitchell, J., Soga, K. 2005. *Fundamentos del comportamiento del suelo*. (3a ed.). John Wileyand Sons: Canada.
- Monged, M. H. E., Hussein, M. T., & Khater, A. E. M. (2018). Elemental and radiological

aspects of geothermal springs and nearby soil and sediment of Al-Lith area: concentration and risk assessment. *Environmental Earth Sciences*, 77(12), 1–16.

NOM-021- SEMARNAT -2000. 2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F.

NOM147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

Moreno. (2000). Propiedades de los suelos. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Reyna, T., Linares, J., Reyna, S., Lábaque, M. (2014). Aplicación de modelos unidimensionales de flujo en suelos no saturados y transporte de herbicidas en zonas agrícolas. *Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 9(3) DOI:10.4136/ambi-agua.1165

Pastrana-Corral, M. A., Wakida, F. T., García-Flores, E., Rodríguez-Mendivil, D. D., Quiñonez-Plaza, A., & Piñon-Colin, T. D. J. (2016). Soil mercury levels in the area surrounding the Cerro Prieto geothermal complex, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(8).

Pastrana-Melchor Eugenio J, Fernandez-Solorzano Maria Elena, Mendoza-Rangel Ernesto, & Hernandez-Ayala, C. (2005). Environmental framework for the development of the Los Humeros, Puebla, geothermal field. *Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía*, 18(1), 3–17.

Poesen, J., & Lavee, H. (1994). Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 23(1–2), 1–28.

Prado, B., Duwig, C., Márquez, J., Delmas, P., Morales, P., James, J., & Etchevers, J. (2009). Image processing-based study of soil porosity and its effect on water movement through Andosol intact columns. *Agricultural Water Management*, 96(10), 1377–1386.

- Quinto, A., Santoyo, E., Torres, V., Gonzalez, E., & Castillo, D. (1995). Estudio geoquímico-ambiental de los efluentes naturales producidos en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla. *Ingeniería Hidráulica En México*, 10(3), 21–27.
- Ramos, Q., Armienta, M. A., Aguayo, A., & Cruz, O. (2021). Evaluation of the interactions of arsenic (As), boron (B), and lead (Pb) from geothermal production wells with agricultural soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111843.
- Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revista de Iniciación Científica*, 4, 101–105.
- Rodríguez, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. In Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura FAO.
- Salamanca, A., & Siavosh, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana. *Cenicafé*, 56(4), 381–397.
- Sánchez Espinosa, J. A., & Rubiano Sanabria, Y. (2015). Procesos específicos de formación en Andisoles, Alfisoles Y Ultisoles En Colombia. *Revista EIA*, 1(1), 85–97.
- Sandoval, M., & Hodgson, S. F. (2012). La protección ambiental en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, 17(1), 114–119.
- Santoyo, E., & Barragan, R. (2010). Energía Geotérmica. *Ciencia*, 40–51.
- Secretaría de energía. (2009). Programa especial para el aprovechamiento de energías renovables. *SENER*, 50, 23–59.
- Seisdedos, M. (2012). Climatización de edificios por medio del intercambio de calor con el subsuelo y agua subterránea aspectos a considerar en el contexto local. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Geología, 31–45.
- SGM. (2004). Carta Geológica Minera Chignahuapan.
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Salazar-Hermenegildo, N., Boijseauneau-López, M. E., & Pérez-Orozco, J. D. (2018). The Acoculco Caldera

- Complex magmas: Genesis, evolution and relation with the Acoculco geothermal system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358(June), 288–306.
- Jiménez, M., Olvera-Balderas D. (2019). Elementos potencialmente tóxicos (Cd, Hg, Pb y Zn) en suelos impactados por planta recicladora de plomo (Zacatecas, México), a una década de parar operaciones. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35 (3) 651-669, 2019 DOI: 10.20937/RICA.2019.35.03.11
- Staff, S. S. (2015). Illustrated guide to soil taxonomy, version 2. In Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska (Vol. 11, Issue 1).
- Tello, H.E., Geoquímica de la zona geotérmica de la Caldera de Acoculco, Pue., México, CFE Depto. de Exploración, informe 34-36 inedito, (16p), 1986.
- Torres A., J. S. (2014). Principios básicos para identificar problemas de drenaje en el cultivo de la palma. *Boletines técnicos*, (34).
- Torres-Sallan, G., Schulte, R. P. O., Lanigan, G. J., Byrne, K. A., Reidy, B., Simó, I., Six, J., & Creamer, R. E. (2017). Clay illuviation provides a long-term sink for C sequestration in subsoils. *Scientific Reports*, 7(April), 1–7.
- Úbeda Rivera, J. S., & Delgado Dallatorre, Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 4(7), 889–896.
- Varekamp, J. C., & Buseck, P. R. (1983). Hg anomalies in soils: A geochemical exploration method for geothermal areas. *Geothermics*, 12(1), 29–47.
- Verdugo, E. R. (2017). Hidrología e hidroquímica de tres zonas con potencial geotérmico (tesis de maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Viggiano-Guerra, Armenta, F., & R. Ramírez. (2011). Evolución del sistema geotérmico de acoculco, Pue., México: Un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones. *Geotermia*, 24(1), 14–24.
- Wirnkor, V. A., & Ngozi, V. E. (2017). Risk associated with heavy metals in children

playground soils of Owerri metropolis , Imo State , Nigeria. University of Technology, Owerri, Imo State, Nigeria, 10, 49–69.

Yépez, S. D. (2018). Evolución de la geotermia en Michoacán : Campo Geotérmico Los Azufres. Generación de Proyectos Geotermoeléctricos.