



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

División Académica de Ciencias Biológicas

"Disciplina es, nunca perder de vista lo que se quiere alcanzar"



**Vulnerabilidad de suelos de Tabasco por contaminación
con aguas congénitas**

Tesis

Para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería Tecnología y Gestión Ambiental

Presenta:

Ingeniero Karla Anahy Castro Lavariega

Directores:

Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez

Dr. Randy Howard Adams Schroeder

Villahermosa, Tabasco. junio de 2024.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024
Felipe Carrillo
PUERTO
GOBIERNO DEL PROLETARIADO
REVOLUCIONARIO Y DEFENSA
DEL MAYO
GOBIERNO DE
MÉXICO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tab., a 16 de Mayo de 2024

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
PRESENTE**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. KARLA ANAHY CASTRO LAVARIEGA** egresado de la Maestría en **INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **"VULNERABILIDAD DE SUELOS DE TABASCO POR CONTAMINACIÓN CON AGUAS CONGÉNITAS"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

C.c.p. - Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado

EJAT.
DIRECCIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS





**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024
Año de
**Felipe Carrillo
PUERTO**
MANEJO DEL RESULTADO
REVOLUCIONARIO Y DEFENSOR
DEL BIEN
GOBIERNO DE
MÉXICO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

MAYO 16 DE 2024

**C. KARLA ANAHY CASTRO LAVARIEGA
PAS. DE LA MAESTRIA EN INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y
GESTIÓN AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental titulado: **"VULNERABILIDAD DE SUELOS DE TABASCO POR CONTAMINACIÓN CON AGUAS CONGÉNITAS"**, asesorado por la Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez y Dr. Randy Howard Adams Schroeder, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado integrado por el M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, M. en C. Marco Antonio Hernández Cobián, Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez, MIPA. Liliana Hernández Acosta y Dr. Allan Keith Cruz Ramirez.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

C.c.p.- Expediente del Alumno.
C.c.p.- Archivo

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **“VULNERABILIDAD DE SUELOS DE TABASCO POR CONTAMINACIÓN CON AGUAS CONGÉNITAS”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el día 16 de mayo del dos mil veinticuatro.

AUTORIZO



KARLA ANAHY CASTRO LAVARIEGA



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tabasco a 16 de mayo de 2024

C. KARLA ANAHY CASTRO LAVARIEGA
EGRESADA DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA,
TECNOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los trabajos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados en el SNP-CONAHCyT.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones y el reporte de originalidad de su documento de tesis. Con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, se realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y se emitieron las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: **"Vulnerabilidad de suelos de Tabasco por contaminación con aguas congénitas"**.

OBSERVACIONES:

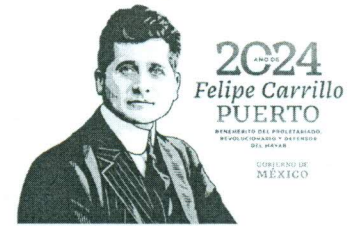
1. **El índice de similitud obtenido fue de 10%**, el cual se ubica dentro del estándar de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT.
2. Aun que el índice de similitud obtenido indica coincidencias, éstas se refieren a frases en la sección de Antecedentes y Métodos, principalmente. Lo anterior no demerita el documento de tesis, pero se solicita a la sustentante revisar las oraciones identificadas con similitud y ajustarlas a una redacción propia. Las máximas similitudes fueron halladas en textos citados que, aunque algunas de estas citas no se realizaron correctamente, queda de manifiesto con suficiente claridad la fuente original de esos textos. Se recomienda a la autora, revisar las citas y el listado de referencias consultadas empleando de manera apropiada algún estilo específico de citas y referencias bibliográficas (APA, Vancouver, entre otros).





UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

3. Es importante recordar que citar otros estudios implica de un análisis y síntesis de la información, que debe privilegiarse por encima del parafraseo y la cita textual.
4. **Se adjunta el informe de originalidad de la tesis** obtenido a través de la herramienta Turnitin iThenticate.
5. Finalmente, se le solicita a la C. Karla Anahy Castro Lavariega, integrar en la versión final de tesis, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.C.P. Archivo

Vulnerabilidad de suelos de Tabasco por contaminación con aguas congénitas

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	fecic.org.ar Internet	337 palabras — 3%
2	biblat.unam.mx Internet	98 palabras — 1%
3	biblioteca.itson.mx Internet	84 palabras — 1%
4	www.ptolomeo.unam.mx:8080 Internet	69 palabras — 1%
5	dspace.ugalca.cl Internet	68 palabras — 1%
6	docplayer.es Internet	53 palabras — 1%
7	es.slideshare.net Internet	41 palabras — < 1%
8	doczz.es Internet	39 palabras — < 1%
9	digitum.um.es Internet	30 palabras — < 1%

DEDICATORIA

Es tan beautiful como lo soñe.

A mi adorada y siempre amorosa familia, a mis padres que han sido un sostén de amor y empatía Yadira, Emanuel, Carlos, a mis personas favoritas Valery, Lulu, Constanza, Aurora, a toda y cada uno de mis familiares, muchas gracias por siempre apoyar este camino que comenzó hace algunos años, y sobre todo nunca juzgar el tiempo que ha llevado llegar hasta aquí, infinitas gracias por todo su amor y comprensión y sobre todo su apoyo de aliento con las palabras indicadas para jamás dejar este sueño atrás.

A Constanza mi querida Coti, gracias por ser solo inspiración y luz para mí, nos graduamos de otra carrera juntas, peiname siempre el alma.

A mi adorado compañero de vida y ahora esposo, infinitas gracias por coincidir en este viaje y apoyarme desde el día uno, gracias por siempre escucharme aun cuando el camino se tornaba complejo, gracias por siempre estar, gracias por todo, esta también es tu titulación, te amamos Anu.

A todas mis amigas guacamayas, gracias por hacerme sentir un ser capaz de poder lograr cualquier cosa que se interponga, su compañía me expande y llena de amor, las amo.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez por su apoyo y amor infinito que me mostro desde la primer platica, gratitud total por siempre confiar en que se podía terminar este proyecto, por darme su confianza y permitirme poder trabajar en su equipo, y sobre todo por todos sus consejos de vida, la tengo siempre muy presente, bendiciones infinitas por su magia y su esencia para entender la ciencia, es una mujer admirable.

Al Dr. Randy Howard Adams Schroeder por brindarme siempre su paciencia para poder entender las ciencias del suelo, y toda su aportación en campo, sus consejos y enseñanza en la maestría y sobre cosas de la vida, su entrega en la ciencia es de admirar.

A la MIPA Liliana Hernández Acosta, por su amistad, y todo su apoyo en el laboratorio de remediación durante todo el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de generación Eder y Alma gracias por hacer más ligero este camino y sobre todo por toda su paciencia hacia esta geóloga.

A todo el laboratorio RAMREM donde conocí a una familia espectacular, cada día lo hacían único y especial aun el estrés estuviera al tope.

Tabla de contenido

1.	Resumen.....	8
1.1	Abstract.....	10
2.	Introducción.....	11
3.	Justificación.....	14
	Marco teórico.....	15
4.1	Agua congénita.....	15
3.1.1	Características del agua congénita.....	15
3.1.2	Impacto ambiental del agua congénita.....	16
3.2	Suelo.....	16
3.2.1	componentes del suelo.....	16
3.2.2	Estructura del suelo.....	17
3.3	Tipos de suelos en Tabasco.....	18
3.4	suelos salinos/sódicos y salino-sódicos.....	18
3.4.1	Suelos salinos.....	18
3.4.2	Suelos sódicos.....	19
3.4.3	Suelos salinos sódicos.....	20
4.	Antecedentes.....	21
4.1	Estudios de vulnerabilidad en suelos.....	21
4.2	Estudios sobre agua congénita.....	22
5.	Objetivos.....	23
5.1	objetivo general.....	23
6.2	Objetivos específicos.....	23
	23	
	Metodología.....	24
7.1	Desarrollo del experimento.....	24
5.2	Selección del tipo de suelo.....	25
5.3	Colecta de muestras.....	27
5.3.1	tratamiento de muestras.....	27
5.4	Caracterización inicial de suelos.....	27
5.4.1	Determinación de la CE.....	27

5.4.2	Determinación del pH	28
5.4.3	Porcentaje de humedad (%H)	28
5.4.4	Densidad aparente (DA)	28
5.4.5	Densidad real (DR).....	29
5.4.6	Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	29
5.4.7	caracterización del agua congénita.....	30
5.4.8	Diseño experimental	31
7.3.9	Evaluación del efecto de las aguas congénitas sobre los diferentes tipos de suelos	32
6.	Resultados y discusión	34
6.1	identificación de las baterías de separación en los principales suelos de Tabasco	34
8.2	Caracterización de agua congénita.....	40
6.2	Caracterización de los suelos utilizados en el estudio	40
8.3	Salinidad en Suelo contaminado con Agua congénita	42
8.4	Sodicidad en Suelo Contaminado por agua congénita (PSI)	45
7.	Conclusiones.....	51
8.	Bibliografía	56
9.	Anexos	61

Tabla de figuras

Figura 1.....	17
Figura 2.....	24
Figura 3.....	26
Figura 4.....	31
Figura 5 Mapas de baterías de separación con suelos del estado de Tabasco.	36
Figura 6 Relación entre la cantidad de agua congénita aplicada al suelo y la salinidad de los diferentes tipos de suelos.....	44
Figura 7.....	49

Tablas

Tabla 1 Unidades edafológicas donde se localizan las baterías de separación.....	35
Tabla 2 Características del agua congénita de la batería de separación jujo.....	40
Tabla 3 Características de los suelos en el estudio.	41
Tabla 4 Ubicación de las baterías de separación con las observaciones de suelos.	51
Tabla 5 características físicas del suelo.....	52
Tabla 6 Vulnerabilidad de los suelos.....	53

Tablas de anexos

Figura A 1 RAS calculado de la CE Y Ca-Mg soluble.....	62
Figura A 4 Valores de RSI calculado para el Gleysol.....	64
Figura A 5 RSI calculado para el Acrisol.....	65

1. Resumen

En este estudio se evaluó la vulnerabilidad de suelos en Tabasco de ser afectados por contaminación de agua congénita. En la primera parte, se realizó un estudio de cartografía para ver las incidencias de baterías de separación (en donde se separa el agua congénita del hidrocarburo) con las unidades de suelo. Casi la mitad de las baterías se encontraron en Histosoles o Arenosoles, que son suelos no probables de sufrir problemas a mediano-largo plazo por derrames de aguas congénitas (debido a lavado natural del suelo y la falta de estructura pre-derrame). Casi un cuarto de las baterías están situadas sobre suelo Acrisol o Alisol (de arcillas rojas de terrazas), una quinta parte se encontró sobre Fluvisoles o Cambisoles con propiedades flúvicas (de aluviones), y menos de la décima parte estaban sobre Gleysoles (inundables). En este contexto, simplemente por ubicación, los suelos de terraza eran especialmente vulnerables y los Gleysoles entre los menos vulnerables. En base estas observaciones, se procedió a la segunda parte de la evaluación de vulnerabilidad. Se seleccionaron tres suelos representativos de la problemática (Acrisol, Fluvisol y Gleysol) para determinar, en términos relativos, la vulnerabilidad por efecto de salinidad y sodicidad. Para esto, los suelos fueron contaminados con diferentes diluciones de agua congénita, y posteriormente, la salinidad y sodicidad fueron determinados.

En términos de salinidad (CE), el Gleysol era el más vulnerable (según los datos de laboratorio) con 69 dS/m con 67% de agua congénita, seguido por el Fluvisol con 56 dS/m, y el Acrisol con 44 dS/m. En términos de sodicidad, el Gleysol y Fluvisol presentaron comportamientos similares, con PSI de 61 – 63 % PSI a 67% de aguas congénitas, aunque en concentraciones más bajas el Fluvisol era un poco menos afectado. El Acrisol era el menos afectado por sodicidad, solo presentando 51 PSI a 67% de aguas congénitas. Estos datos fueron interpretados considerando no solo los datos del laboratorio, también se tomaron en consideración las características de campo (ubicación en el paisaje) y otras características intrínsecas de los suelos (textura, fertilidad)

para evaluar de manera integral los tipos, magnitud y duración de los posibles impactos y los riesgos asociados con cada tipo de suelo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

1.1 Abstract

In this study, the vulnerability of soils in Tabasco to being affected by produced water contamination was evaluated. In the first part, a cartography study was conducted to assess the incidence of separation batteries (where produced water is separated from hydrocarbons) with the soil units. Almost half of the batteries were found in Histosols or Arenosols, which are soils unlikely to suffer medium to long term problems from formation water (due to natural soil washing and lack of pre-spill structure). Almost a quarter of the batteries were situated on Acrisols or Alisols (red clay terrace soils), one fifth were found on Fluvisols or Cambisols with fluvic properties (alluvial soils), and less than a tenth was on Gleysols (flood-prone soils). In this context, simply by location, terrace soils were especially vulnerable and Gleysols among the least vulnerable. Based on these observations, the second part of the vulnerability assessment proceeded. Three representative soils of the problem (Acrisol, Fluvisol, and Gleysol) were selected to determine, in relative terms, vulnerability due to salinity and sodicity effects. For this, the soils were contaminated with different dilutions of formation water, and subsequently, salinity and sodicity were determined.

In terms of salinity (EC), Gleysol was the most vulnerable (according to laboratory data) with 69 dS/m at 67% produced water, followed by Fluvisol with 56 dS/m, and Acrisol with 44 dS/m. In terms of sodicity, Gleysol and Fluvisol exhibited similar behaviors, with an ESP of 61-63% at 67% produced water, although at lower concentrations Fluvisol was slightly less affected. Acrisol was the least affected by sodicity, only showing 51 ESP at 67% produced water. These data were interpreted considering not only the laboratory data but also field characteristics (location in the landscape) and other intrinsic soil characteristics (texture, fertility) to comprehensively evaluate the types, magnitude, and duration of possible impacts and the risks associated with each so. •

2. Introducción

El suelo es un cuerpo natural que se encuentra en la superficie de la tierra y que puede variar en profundidad (Porta et al. 2013) y sus características dependerán de la ubicación geográfica (Palma-López et al. 2017). Cabe mencionar que, es lugar donde se llevan a cabo muchas de las actividades importantes para la vida de las personas, como la agricultura y la ganadería (Schoonover and Crim, 2015; Torres and Rojas, 2018). De acuerdo con Ritchie and Roser (2019) el 71% de la tierra que cubre el planeta (104 millones de km²) corresponde a la superficie de tierra habitable, siendo el 50% (51 millones km²) las que se utiliza para las actividades agrícolas (40 millones km² en ganadería y 11 millones km² en cultivos).

México cuenta con 198 millones de hectáreas de suelo, de las cuales el 14% tienen vocación agrícola (27.4 millones de ha) (Torres and Rojas, 2018), mientras que, en Tabasco la superficie para la actividad agrícola es de 169-213 ha, las cuales se concentran en los municipios de Cárdenas, Huimanguillo, Balancán, Comalcalco y Cunduacán (SIAP, 2019).

En México como en el mundo, el deterioro del suelo implica la pérdida de un recurso natural difícilmente renovable, y con ello la escasez de los alimentos (Anglés et al. 2021). El 57.6% de las causas de la degradación de los suelos en México involucran: la urbanización, sobreexplotación de la vegetación y la actividad industrial (Torres and Rojas, 2018). En el sureste mexicano, la industria petrolera es una de las principales causas de la degradación de los suelos. Lo anterior, debido a que el estado de Tabasco se localiza en la zona petrolera denominada Región Sur, y en la que se encuentran los activos integrales Cinco Presidentes, Bellota-Jujo, Macuspana-Muspac y Samaria-Luna, que hasta el 2018 administraban un total de 156 campos petroleros, y que en el 2021 generaron una producción promedio de 287 mil barriles por día (Cancino et al. 2019; SIE, 2021).

Durante los procesos de exploración y producción de petróleo y gas, la industria petrolera genera residuos que contienen componentes de alta peligrosidad, entre ellos se encuentra el agua congénita. Aunado a la gran actividad petrolera que se realizan en la zona sureste, es muy común que ocurran fugas y derrames de agua congénita (Morales-Bautista, et al. 2011; Dawoud et al. 2021), contaminando el suelo y provocando cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas, y así reduciendo con ello su fertilidad (Rodríguez-Rodríguez et al. 2016). Es importante mencionar que, en el sureste mexicano la mayoría de las instalaciones petroleras se localizan en zonas de suelos con vocación para las actividades agrícolas y especialmente ganaderas.

El agua congénita o de formación, es el agua salada que se encuentra dentro de la roca almacén, asociada a la presencia de hidrocarburos, ya que la mayoría de los cuerpos receptores de hidrocarburo en el sistema petrolero están agrupados a domos e intrusiones salinos en fallas, y trampas estratigráficas.

El crudo contiene sales y agua emulsionada, y estos contaminantes son removidos antes de la refinación por un proceso que se llama deshidratación, en donde se separan el agua del aceite obteniendo como residuo el agua congénita (Mijaylova et al., 2007).

El agua congénita tiene un alto contenido de sales disueltas, como cloruros de calcio y sodio, carbonatos de sodio, cloruros de potasio, sulfatos de calcio o de bario, entre otros; puede incluso contener algunos metales (SEMARNAT, 2003; Lavariega Pulido, 2011). Igualmente, es posible que su salinidad puede ser superior a la del agua del mar (SGM, 2017). Es conocida como agua salada, salmuera, agua producida, agua de producción, agua marginal o agua de desecho (Clark and Viel, 2009; Lavariega Pulido, 2011; Derby et al. 2016; SGM, 2017; Dawoud et al. 2021; Khader et al. 2021). A nivel mundial la explotación de petróleo crudo y gas natural genera 250 millones de barriles de agua congénita por día, y más del 40% se vierten al medio ambiente

(Hedar, 2018). Por su parte en México, durante el 2002, se produjeron 12.09 millones de metros cúbicos de agua congénita, de los cuales se reinyectó el 86.4% y el 14.6% se dispuso en cuerpos receptores (SEMARNAT, 2003).

Como ya se mencionó, uno de los métodos comúnmente empleado para la disposición final de aguas congénitas es el sistema de inyección a pozos petroleros agotados. Sin embargo, debido a la mala operación durante el almacenamiento, transporte e inyectado del agua congénita, existe el riesgo que se presentan derrames. Tales incidentes afectan potencialmente a los cuerpos de agua y al suelo, provocando cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, y con ello reduciendo su fertilidad, siendo afectada la producción agrícola cercanos a las instalaciones petroleras (Morales-Bautista et al. 2011; Rodríguez-Rodríguez et al. 2016).

3. Justificación

En México contamos con leyes en materia de seguridad y medio ambiente donde se espera que las normas de regulación sean más estrictas en materia de contaminación y el daño ambiental que se genera en el suelo al ocurrir un derrame. La legislación y normatividad mexicana que regula la contaminación del suelo es; Ley General de Equilibrio Ecológico, y La Protección al Ambiente; la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos; y las normas oficiales mexicanas como la NOM-143 SEMARNAT 2003 que establece las especificaciones ambientales para el manejo del agua congénita asociada a hidrocarburos. Sin embargo, en toda esta normatividad existen lagunas en las que el agua congénita no se considera como un contaminante peligroso; quedando vacíos sobre el impacto que puede tener en los suelos el agua congénita.

Es por ello la importancia de realizar una evaluación sobre la vulnerabilidad de los suelos de Tabasco que se encuentran cercanos a las instalaciones petroleras, mediante el uso de un diseño experimental realizado a escala laboratorio, con la finalidad de identificar las zonas que puedan ser potencialmente afectadas por futuros derrames de agua congénita. Actualmente no se cuenta con información sobre estudios de la vulnerabilidad de suelos enfocados al derrame de aguas congénitas en el estado de Tabasco. Con los resultados generados de este trabajo de investigación, se obtendrá información que la sociedad científica y de la industria energética podrá utilizar para generar estrategias de respuesta frente a derrames, y en casos necesarios, remediar las zonas afectadas con derrames de aguas congénitas.

Marco teórico

4.1 Agua congénita

Agua congénita es un agua con características saladas que se encuentra dentro de una roca con presencia de hidrocarburos, en su química contiene sales disueltas tales como: (Ca Cl₂, NaCl, CaCO₃, Na₂CO₃, KCl, MgCl₂) según la NOM-143-SEMARNAT-2023. La composición química del agua congénita depende de la formación geológica, de la ubicación geográfica del campo petrolero, el tipo de hidrocarburo, y el método de extracción (Jiménez et al., 2018).

3.1.1 Características del agua congénita

Mohammad et al. (2019) especifica que el agua congénita es un residuo de múltiples composiciones químicas, este residuo se considera como una mezcla de productos orgánicos e inorgánicos. De acuerdo con Jiménez et al. (2018), los grupos de constituyentes que se pueden encontrar en el agua congénita son.

- Sales disueltas
- Aceites y grasas
- BTEX (Benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos)
- Hidrocarburos poliaromáticos
- Ácidos orgánicos
- Fenoles
- Aditivos usados durante la perforación (corrosivos, biocida)
- Compuestos inorgánicos, organitos naturales como calcio, magnesio, sulfatos y bario.

3.1.2 Impacto ambiental del agua congénita

Los riesgos ambientales por el manejo y disposición del agua congénita son la potencial contaminación de los acuíferos durante el proceso de inyección a formaciones geológicas de pozos que no están en producción, y en algunas ocasiones cuando no tienen las medidas adecuadas en los parámetros de limpieza podrían ocurrir derrames y contaminar el suelo de acuerdo a la NOM-143-SEMARNAT-2003, Morales-Bautista et al. (2016) describe que el agua congénita posee cantidades considerables de sales solubles y al ser vertida en los suelos ocasiona problemas de salinidad, deshidratando las plantas y provocando dispersión de las partículas que da como resultado la pérdida de la estructura del suelo.

3.2 Suelo

El suelo es definido como un fenómeno natural con un cuerpo, que está compuesto de sólidos como minerales y materia orgánica, líquidos y gases que ocurren en la superficie terrestre y que ocupa un espacio, principalmente se caracteriza por tener horizontes, capas, y minerales provenientes de un material parental (USDA, 2021). También se puede definir su función como una cubierta delgada en la superficie terrestre de unos pocos centímetros a metros, el cual es natural y está constituido con una interfaz que permite intercambios entre la litosfera, la biosfera, y la atmósfera, los suelos permiten el enraizamiento de las plantas donde estas pueden obtener agua para su crecimiento (Porta et al. 2013).

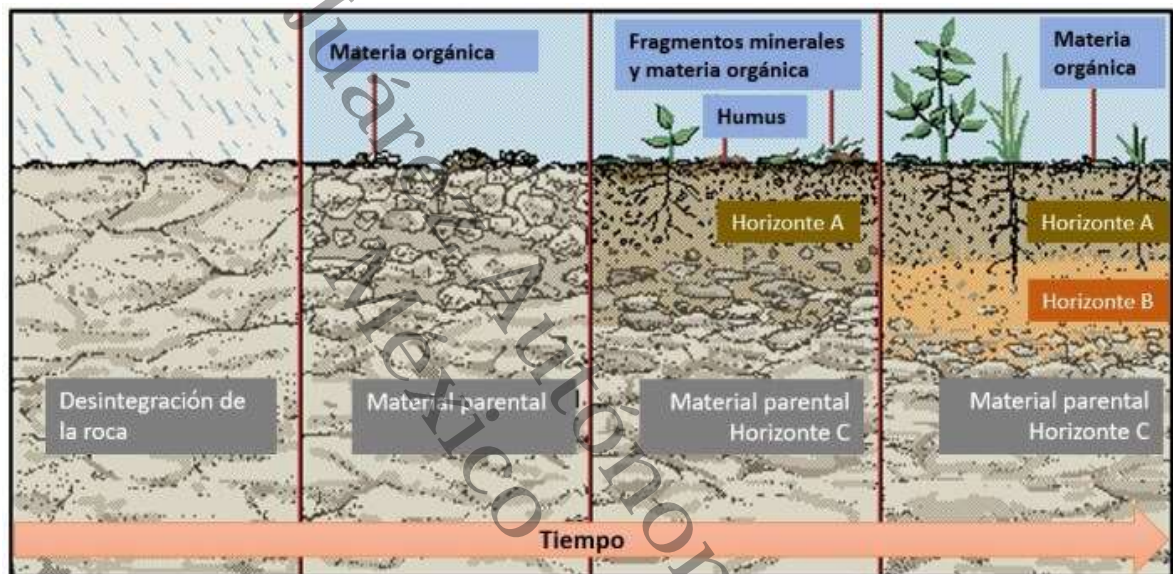
3.2.1 componentes del suelo

Son los componentes abióticos y bióticos del medio en el que desencadenan, orientan, y controlan la intensidad de los procesos que dan lugar a la formación de los suelos, en general los formadores principales son el material parental, clima, seres vivos, posición en el relieve y tiempo (Porta et al. 2013).

3.2.2 Estructura del suelo

El suelo cuenta con una estructura que define sentido amplio como la heterogeneidad especial de diferentes componentes o propiedades este, cuenta con una estructura regida por agentes bióticos y abióticos que se manifiesta a través de la formación constante y la destrucción de poros (FAO, 2021) ver figura 1.

Figura 1 Factores de formación del suelo



Nota: en la imagen se observa los procesos de formación del suelo en comparación con el tiempo necesario para pasar de la roca a la meteorización y como resultado el suelo. Fuente: Intagri 2019

Torres-Guerrero *et al* (2013) describe a la estructura del suelo como la manera en la que las partículas se agrupan de manera individual y con una clasificación de arena, limo y arcilla el cual generan espacios denominados poros, la estructura del suelo está relacionada directamente con la fase líquida, sólida y gaseosa.

3.3 Tipos de suelos en Tabasco

Tabasco se localiza en la Región Sureste de la República Mexicana entre las coordenadas 17°19'00" y los 18° 39' 00" de latitud Norte y los 90° 57' 00" y 94° 08'00" de longitud Oeste. Abarca una superficie de 24661 km², el cual representa el 1.3% del total de México, el estado forma parte de dos provincias la Llanura Costera del Golfo Sur, y la Sierra de Chiapas y Guatemala. Las zonas fisiográficas que se encuentran en el Estado son sierra, calcárea, lomeríos, llanura aluvial, vega de río, llanura de inundación y costa. Se distinguen tres tipos de suelos que fueron originados por aluviones con una génesis de arrastre y deposición de material por parte de los ríos, y por otra parte existen suelos originados "*in situ*" los cuales tienen una génesis derivada de intemperismo de rocas sedimentarias.

Las unidades edafológicas predominantes en Tabasco son el Vertisol Eutríco con 433,000 ha, el Histosol fibríco con asociación de Gleysoles (341,078 ha) y Fluvisol eutríco (245,828 ha) (Palma-López et al., 2007).

Litológicamente son suelos sobre sedimentos no consolidados de planicies fluviales, palustres, lagunares, y costeras que datan de una edad Cuaternaria-Holoceno

3.4 suelos salinos/sódicos y salino-sódicos

3.4.1 Suelos salinos

La salinidad es el resultado de procesos naturales o antropogénicos en todos los suelos que conducen en menor o mayor grado a una acumulación de sales, que pueden afectar la fertilidad (Leidi y Pardo, 2002). Una característica de los suelos salinos es que contiene suficientes sales solubles como para afectar negativamente el crecimiento de la mayoría de las plantas, afecta el movimiento del agua y el aire en el suelo, la capacidad de retener agua y que las raíces se penetren en el horizonte A, contiene una conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo de más de 4 dS/m Las sales que comúnmente se encuentran presente son cloruros y

sulfatos de sodio, calcio y magnesio. La salinización de suelo es un problema que afecta al 6% de los suelos en todo el mundo, en donde el 54% de ellos se ven afectados negativamente por la salinidad que es causado por sodio según establece la NOM-143-SEMARNAT-2003.

Las sales solubles, tienen una concentración de naturaleza variable en función de los ciclos climáticos y de la profundidad freática.

3.4.2 Suelos sódicos

La Sodicidad o alcalinización se desarrolla cuando en la solución del suelo existe una concentración elevada de sodio capaces de sufrir hidrólisis alcalina, de tipo carbonato y bicarbonato de sodio. Los suelos sódicos son aquellos que se originan cuando el ion monovalente sodio desplaza otras bases del complejo de adsorción y se fija a esta estructura superficial, en un nivel de concurrencia que sobrepasa el 15% entre los sitios de intercambio catiónico en el suelo (Szabolcs, 1994). Las altas concentraciones de sodio en los suelos no sólo perjudican las plantas directamente, sino también degradan la estructura del suelo, disminuyendo la porosidad y la permeabilidad del agua (Jenks y Hasegawa, 2005). Estos suelos, que se caracterizan por presentar propiedades físicas y químicas desfavorables para el crecimiento y desarrollo de los cultivos que en ellos se desarrollan, necesitan prácticas especiales para su mejoramiento y manejo (Mashali, 1999).

Los valores de pH de estos suelos usualmente superan 8.5. Sin embargo, la relación entre el sodio intercambiable y el pH no es simple y depende de muchos factores. Por ello, pueden encontrarse a veces suelos sódicos con pH menor a aquel valor. Los valores muy altos de pH (superiores a 9.0-9.5) están asociados con la presencia de carbonato de sodio (Na_2CO_3). La presencia de sodio intercambiable es de carácter más estable en los suelos, pues aparece como catión (Na^+) adsorbido en la superficie de las partículas de arcilla. El catión sodio aparece siempre

rodeado de una capa compuesta por moléculas de agua. Estas moléculas están fuertemente retenidas al átomo de sodio, e impiden que las arcillas saturadas con sodio floculen. Como el sodio impide la floculación no se genera en ellos una estructura de suelo estable. Es por ello que lo que distingue a los suelos sódicos es su inestabilidad estructural. Cuando están húmedos se dispersan con facilidad, lo cual promueve pérdidas de materia orgánica y arcillas dispersas (Taboada-Lavado, 2008).

3.4.3 Suelos salinos sódicos

La propiedad distintiva y dominante de los suelos salinos es la alta concentración de electrolitos, mientras que de los suelos sódicos (estos últimos también denominados alcalinos) es la alta relación de adsorción de sodio (RAS) de su solución y, asociado con ello, el elevado porcentaje de sodio intercambiable (PSI). A menudo, pero no necesariamente siempre, los suelos sódicos poseen altos valores de pH. Este hecho implica que la sola medida de pH no es un indicador confiable de sodicidad, ya que elevados valores de pH (>8.5) indican presencia de altas concentraciones de sodio intercambiable, pero puede haber también suelos sódicos con valores de pH entre 7.5 y 8.5. el exceso de sodio intercambiable afecta principalmente el funcionamiento físico hídrico de los suelos. Estos pueden a menudo tener moderados contenidos hídricos, pero el agua casi no se mueve y no es así aprovechada por las plantas (Taboada-Lavado, 2008)

4. Antecedentes

4.1 Estudios de vulnerabilidad en suelos

Lugo-Morin y Rey en el (2009) evaluaron la vulnerabilidad de 14 unidades de suelo en cuatro diferentes regiones en el estado de Guárico Venezuela, identificando los riesgos potenciales por el desarrollo de diferentes cultivos, obteniendo como resultado que algunas zonas pueden ser potencialmente afectadas por una erosión hídrica, mientras que otras tantas presentan riesgos por la agro-contaminación; fósforo, nitrógeno, metales pesados, residuos de plaguicidas y fertilizantes ocupados en los cultivos.

Blanco-Sepúlveda en el (2008) evalúa un área de la provincia de Málaga, España con el fin de definir la influencia de la carga ganadera sobre las propiedades físicas del suelo, teniendo como hipótesis que estas propiedades deben estar condicionadas por las variables que influyen sobre las mismas, de las cuales dependerá la magnitud de la alteración en el suelo.

Para Zamudio y Méndez (2011) el objetivo de estudio fue analizar la situación de vulnerabilidad de los suelos agrícolas ante el fenómeno de erosión hídrica y eólica, en la región centro-sur del estado de Nayarit, México; desde un enfoque económico-ambiental, utilizando una metodología de sistemas geográficos de información y considerando cinco cultivos principales: frijol, hortalizas, maíz, mango y sorgo. En su reporte muestran la vulnerabilidad ante la erosión de los suelos, afectando mayormente a los suelos de tipo Luvisol en los municipios de Tepic y Santa María del Oro, donde se combinan pastizales inducidos. Por otro lado, la erosión es menor en la agricultura combinada con selva caducifolia.

4.2 Estudios sobre agua congénita

Palma et al.(2002) describe una región donde el suelo fue afectado por salinización, el sistema lagunar costero la Machona - Pajonal - La Redonda - Tupilco que se encuentra en el Noreste de Tabasco y forma parte de la Chontalpa. Este sistema está comunicado con el Golfo de México, fisiográficamente tiene tres barras, la barra de Tupilco, la Boca de Panteones en el centro y al Norte la Barra de Santa Ana. En 1975 la boca de Santa Ana fue abierta artificialmente con la finalidad de ingresar agua del Golfo, provocando una salinización de suelos aproximadamente 12,480 hectáreas y que alcanzó una conductividad eléctrica de 25 a 59 mmhs/cm con un porcentaje de sodio intercambiable de 31.6%. Este proceso de salinización fue muy severo, destruyó 11,375 hectáreas de vegetación tipo hidrófila y 2,105 de pastizales.

Adams et al., (2008) menciona que los cambios de pH y salinidad en los suelos no son causados directamente por hidrocarburos, sino por el agua de producción que se encuentra asociada a los derrames de petróleo. Esta agua generalmente tiene un alto contenido de sales disueltas provenientes de las formaciones geológicas (domos salinos o diapiro) de los yacimientos de petróleo, y este residuo puede afectar la conductividad eléctrica, la relación de absorción de sodio y en ocasiones el pH del suelo.



5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad de tres principales tipos de suelos, frente a los potenciales derrames de agua congénita en la Región Sur de producción petrolera.

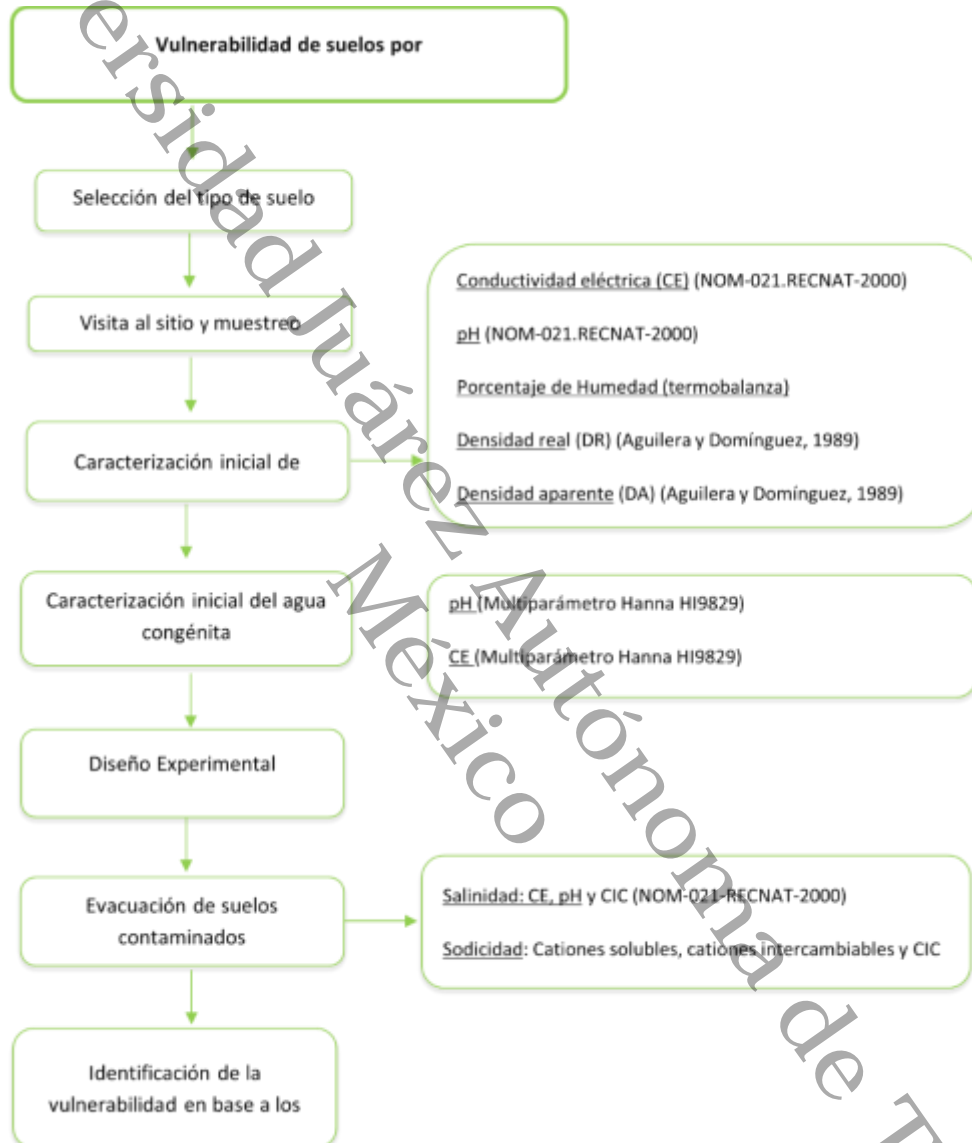
6.2 Objetivos específicos

- Identificar los suelos predominantes y potencialmente vulnerables en zonas de riesgo por derrames de agua congénita en la Región Sur de producción petrolera.
- Conocer las características físicas y químicas de los suelos identificados y el agua congénita.
- Determinar la vulnerabilidad de los suelos a los efectos del agua congénita, mediante la estimación de parámetros indicadores, el coeficiente de Gapon.

Metodología

7.1 Desarrollo del experimento

Figura 2 Diagrama de metodología para el proyecto de investigación.



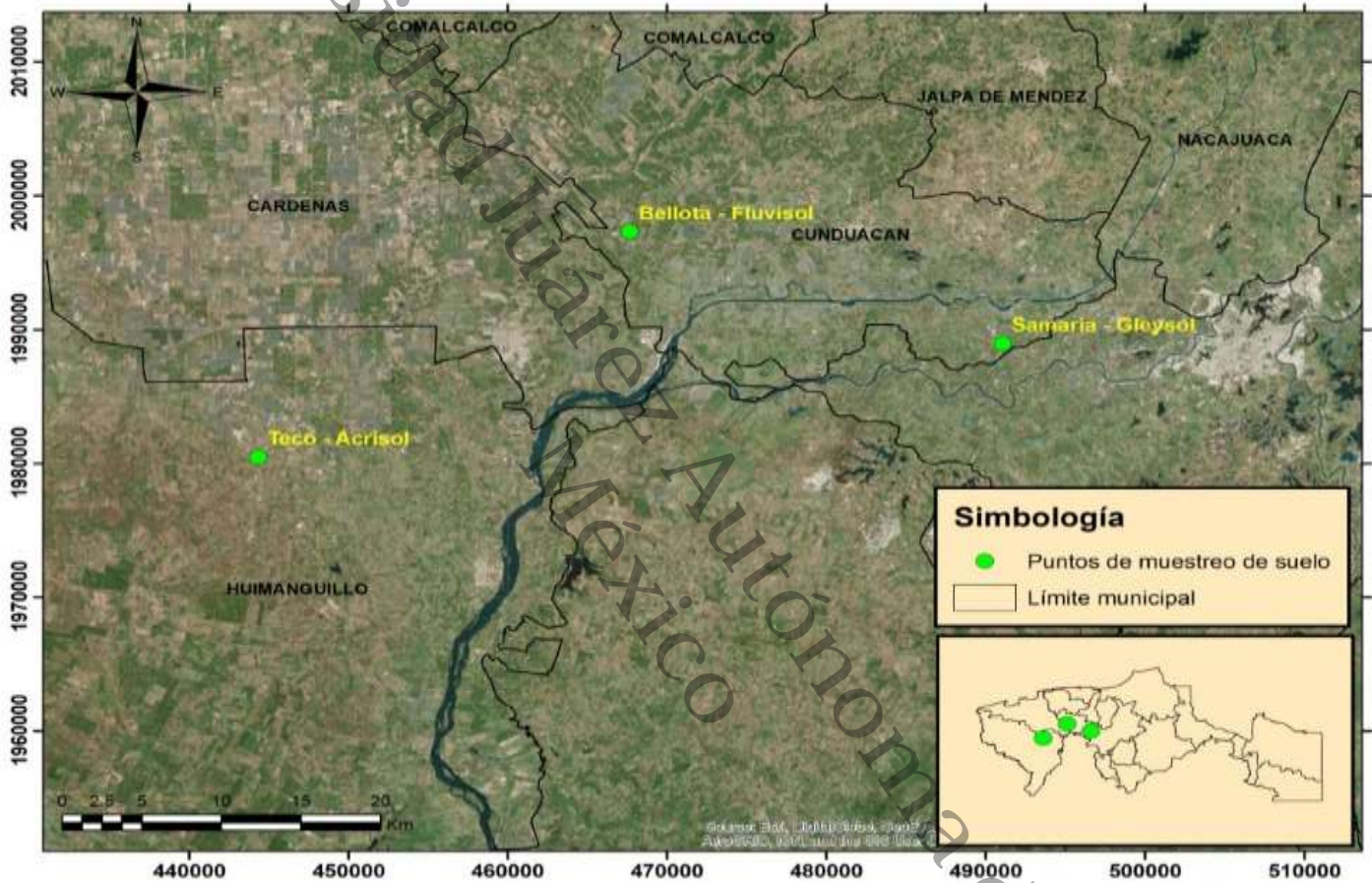
Nota: en la figura se detalla los pasos en que se realizó la parte experimental del proyecto de investigación, elaboración propia.

5.2 Selección del tipo de suelo

Se colectaron datos sobre los tipos de suelos que existen en el estado de Tabasco, así como la historia de cuáles han sido los derrames de agua congénita. Posteriormente, se procedió a la ubicación de las baterías de separación dentro del territorio Tabasqueño y si alguna presento algún derrame de agua congénita. Con esta información se realizó un censo para determinar la densidad de baterías de separación en cada unidad edafológica, y analizar si la estructura de cada unidad podría verse afectada en caso de ocurrir un derrame. Posterior a eso se determinó la textura para poder elegir los suelos a muestrear. A partir de lo anterior se seleccionaron los puntos de muestreo (Fig. 3).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

Figura 3 Ubicación de las unidades de suelo utilizadas en la investigación.



Nota: El siguiente mapa muestra los puntos seleccionados para la parte del muestreo de suelo, para la realización de este se utilizó un software QGIS, y metadatos libres tomados del INEGI (2017)

5.3 Colecta de muestras

Con ayuda de una pala recta se retiró la vegetación superficial en el punto de muestreo, y se excavó 30 cm aproximadamente hasta obtener 20 kg de suelo. Las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Remediación de la División Académica de Ciencias Biológicas - UJAT, para su caracterización. El suelo Acrisol se colectó a un costado de la batería de separación Tecominoacán en el municipio de Huimanguillo, el suelo Fluvisol se colectó cerca de la batería Bellota y el suelo Gleysol se colectó en las inmediaciones de la batería Samaria en el municipio de Cunduacán. Respecto al agua congénita, se obtuvo por medio de una donación, por un grupo multidisciplinario de operación de pozos e instalaciones del activo integral de producción BS03, por parte de la empresa PEMEX en el año 2018, en la batería de separación Jujo, cercana a la batería de separación Tecominoacán.

5.3.1 tratamiento de muestras

Una vez en el laboratorio, las muestras de suelo fueron secadas al aire libre, trituradas y pasadas por un tamiz con diámetros de 2mm. Las muestras fueron colocadas en cubetas de plástico con tapas, para su posterior caracterización física y química. En cuanto al agua congénita, una vez en el laboratorio, se determinó su CE, salinidad y pH.

5.4 Caracterización inicial de suelos

5.4.1 Determinación de la CE

La CE en suelos se midió preparando una pasta saturada; tomando una cantidad de muestra y llevando hasta la saturación, pasadas 24 horas se filtró con ayuda de una bomba de vacío, generalmente se expresa en mmhos/cm (agua) o dS/m (suelo). Existe una relación directa entre la concentración de sales distribuidas en la solución del suelo y la intensidad con la que se puede conducir la corriente. De la muestra de suelo molida y tamizada se tomaron 100 g y se

agregó agua desionizada hasta alcanzar el punto de saturación. Se dejaron en reposo por 24 horas posteriormente se recuperó el extracto con ayuda de una bomba de vacío, un matraz Kitasato y filtros Whatman (SEMARNAT, 2002). Al extracto recuperado se le midió la CE usando un equipo multiparamétrico marca Hanna modelo HI9829.

5.4.2 Determinación del pH

Para determinar el pH se realizó una solución suelo/agua 1:2.5 en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, se mezcló con ayuda de un multiagitador por 30 minutos a 180 rpm. Al finalizar del tiempo se recuperó el extracto de la solución usando filtro Whatman no. 42, posteriormente se midió el pH de acuerdo con lo propuesto por Muñoz et al., 2013, usando el equipo multiparamétrico marca Hanna modelo HI9829.

5.4.3 Porcentaje de humedad (%H)

El contenido de humedad de las muestras se midió inmediatamente después de ser colectadas en campo y después de terminar el tamizado para corroborar su sequedad mediante una termobalanza MB35 Ohaus, en el cual se mide la diferencia entre el peso de la muestra húmeda y después de someterla a una temperatura de 100 °C. Esta diferencia se muestra en unidades de porcentaje.

5.4.4 Densidad aparente (DA)

Se determinó mediante el principio de densidad aparente de un suelo, que se encuentra descrito en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (AS-03), basado en la masa y volumen total, en el que se considera como el volumen macizo de las partículas de un suelo, más el volumen de los poros y de

los huecos, el principio es reflejar el contenido total de la porosidad, la compactación y la facilidad de la circulación de agua y aire (SEMARNAT, 2002).

5.4.5 Densidad real (DR)

El método establece una relación de masa y volumen; para esto se pesaron cinco gramos de suelo y se obtuvo el volumen de los componentes minerales y la materia orgánica para identificar la densidad excluyendo los espacios vacíos (Aguilera & Domínguez, 1989).

5.4.6 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Este método desarrollado por Schollenberger y Simon, 1945, mide la capacidad de intercambio catiónico por medio del desplazamiento controlado de cationes conocidos, utilizando la regla química de la acción de masas y el principio establecido en la serie de desplazamiento por cargas, donde los cationes de mayor carga pueden remplazar a los de menor carga. En un embudo de vidrio se coloca un filtro Whatman no. 42 y sobre este último se coloca una cantidad conocida de suelo molido y tamizado. Posteriormente se realizan tres lavados adicionando una solución con un catión (Ca^{++}) conocido, el cual desplazará a todos los cationes adsorbidos en el suelo ocupando el sitio que ellos tenían en los coloides; después, se elimina el exceso del catión con un disolvente libre de electrolitos (alcohol etílico, grado reactivo). Por último, se adiciona un segundo catión (Na^+), el cual remplazará al primer catión (Ca^{++}) para sacarlo a la solución del suelo donde se valorará titulado con solución de versenato. Esta prueba se modificó de acuerdo con los requerimientos de cada suelo (ver a detalle en Sección A.1.).

5.4.7 caracterización del agua congénita

Para conocer como está constituida el agua congénita se llevó a cabo la evaluación de los análisis más representativos para el proyecto. Se colocó la muestra en un vaso de precipitado de un litro y fue homogeneizada posteriormente por medición directa con el equipo multiparámetro de la marca Hanna HI 98195 se obtuvieron los valores de CE, pH y Sólidos Disueltos Totales (SDT). Por otra parte, se analizó para hidrocarburos totales utilizando en método EPA 418.1, modificado para usar dicloroetileno como solvente, con evaporación a residuo, y re-disolución en percloroetileno (PCE) para la lectura. Se uso petróleo crudo mediano para preparar la curva de calibración en PCE.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

5.4.8 Diseño experimental

El diseño consistió en preparar por cada tipo de suelo (Fluvisol, Gleysol y Acrisol) 7 unidades experimentales con 3 repeticiones (21 unidades en total por tipo de suelo) con 500 g de suelo en cada una. Las muestras se colocaron en recipientes de plástico de aproximadamente 800 ml (Fig. 4)

Figura 4 Esquema del diseño experimental de suelos a contaminar.



Experimento basado en la capacidad de campo de cada unidad; se agregan porcentajes de agua congénita y el restante se completa con agua de grifo. En total 21 unidades por suelo.

Nota: En el esquema se muestra cada unidad de suelo a contaminar con el respectivo porcentaje de agua congénita, elaboración propia.

Una vez preparadas las unidades experimentales, se le adicionó diferentes concentraciones de agua congénita al 0, 13, 20, 30, 44, 67 y 100% utilizando el valor de capacidad de campo conocido. Las unidades que contenían menos porcentajes de agua congénita fueron llevadas a saturación completando su máxima capacidad de campo con agua de la corriente.

Posteriormente se mezcló con ayuda de un agitador de vidrio hasta alcanzar su homogenización

7.3.9 Evaluación del efecto de las aguas congénitas sobre los diferentes tipos de suelos

7.3.9.1 *salinidad*

Para identificar la presencia de problemas a causa de la salinidad se determinaron tanto la CE y el pH por el método de pasta saturada, en cada una de las muestras de suelos (de Fluvisol, Gleysol y Acrisol) contaminadas a diferentes concentraciones de agua congénita (SEMARNAT, 2002). La CE y el pH se midieron a partir del extracto obtenido en la pasta saturada, con ayuda del equipo multiparamétrico marca Hanna modelo HI9829.

7.3.9.2 *Determinación de Sodicidad en suelos afectados por agua congénita*

Se desarrollaron análisis de cationes solubles, intercambiables y CIC, a las muestras contaminadas con agua congénita para estimar la sodicidad en los suelos, y de esta manera, calcular teóricamente el coeficiente de Gapón, asociado a cada unidad de suelo e identificar la vulnerabilidad de cada unidad (Sección A.2.).

7.3.9.3 *Cationes solubles*

La determinación de los cationes solubles se realizó a partir del extracto obtenido en la pasta de saturación, y posteriormente se recuperó la solución con ayuda de un filtro Whatman, se toman 50 ml y se llevan a titulación hasta alcanzar el vire. La relación suelo-agua usada en la extracción del suelo afecta a la composición iónica del extracto (Muñoz et al., 2013). Lo relevante de este análisis es que sus resultados son útiles para el cálculo de la relación de absorción de sodio (RAS) (ver a detalle en el Sección A.3.).

7.3.9.4 *Cationes Intercambiables*

La extracción de cationes de los suelos se llevó a cabo usando una solución de sal neutra; el acetato de amonio en solución normal y ajustado su pH a 7 es la más usada en el mundo. Cuando la extracción se hace con la relación de suelo solución de 1:5 y agitando durante 5 min, entonces los cationes extraídos se expresan como "intercambiables". Para hacer la evaluación de los suelos, el calcio y magnesio tienen la propiedad de reaccionar el EDTA (Etilen-Diamino-Tetracético) a pH superior a 9 y formar un complejo (Muñoz et al., 2013). Con los resultados de estas pruebas se pudieron estimar valores de RSI y PSI, ocupados para el cálculo de coeficiente de Gapon teórico, (ver a detalle en el Sección A.2.).

7.3.9.5 *Capacidad de Intercambio Catiónico*

La capacidad de intercambio catiónico en los suelos contaminados se midió de acuerdo con el método propuesto por Schollenberger y Simón, (1945). Descrito de manera extensa en el apartado pasado.

6. Resultados y discusión

6.1 identificación de las baterías de separación en los principales suelos de Tabasco

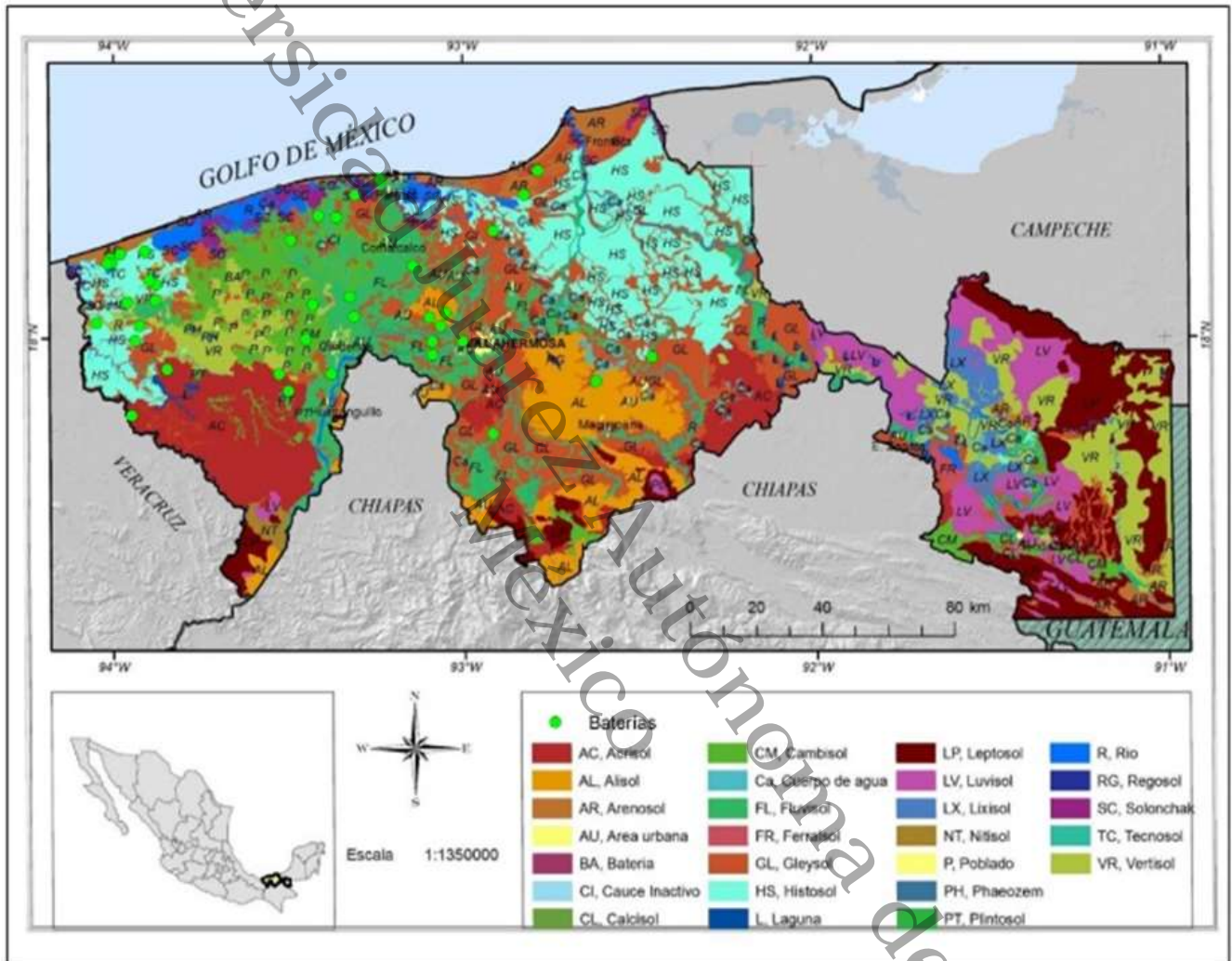
Las unidades edafológicas más susceptibles a un derrame de agua congénita son las zonas donde se localizan las baterías de separación (Tabla 1), las cuales fueron identificadas en el mapa del estado de Tabasco (Fig. 7). En varios sitios, y según el nivel de detalle de la cartografía más actualizada (Palma-López et al. 2017), en total se observaron 34 sitios, de los cuales, aproximadamente la mitad (16/34) se ubicaron en zonas pantanosas (Histosoles) o en suelos arenosos de la costa (Arenosoles). Aproximadamente un cuarto (8/34) se ubicaron en terrazas (Alisoles y Acrisoles), y casi un tercio (10/34) en aluviones. De estos últimos, aproximadamente tres-cuartos (~7/10) eran en zonas con drenaje buena a mediana (Fluvisoles/Cambisoles con propiedades flúvicas) y aprox. un cuarto (~3/10) en áreas inundables (Gleysoles).

Tabla 1 Unidades edafológicas donde se localizan las baterías de separación.

Unidad edafológica	Numero de baterías de separación	Municipio
Histosol	10	Huimanguillo
Arenosol o Histosol	4	Cárdenas
Acrisol	4	Huimanguillo
Cambisol	3	Cárdenas
Cambisol o Fluvisol	2	Cunduacán
Alisol	3	Centro
Fluvisol o Gleysol	3	Centro
Gleysol	1	Jalapa
Alisol	1	Macuspana
Gleysol	1	Macuspana
Arenosol	2	Centla
Resumen:		
Histosol/Arenosol	16	
Alisol/Acrisol	8	
Fluvisol/Cambisol	5-8	Probablemente 7
Gleysol	2-5	Probablemente 3
Total	34	

Usando información del INEGI, 2019

Figura 5 Mapas de baterías de separación con suelos del estado de Tabasco.



Mapa de baterías de separación vs unidades edafológicas del estado de Tabasco, elaboración

propia.

Las baterías de separación existentes en el estado de Tabasco se identificaron dentro de las unidades de suelo mostradas en el cuadro 1. Cabe mencionar, la estrategia bajo la cual se determinó el seguimiento de la esta investigación fue identificar tres tipos de suelos representativos de la problemática, basados en los intereses agrícolas del estado de Tabasco y el potencial del suelo de sufrir impactos por la salinización/sodificación. De esta manera, aunque los Histosoles ocupan el segundo lugar en extensión con el 14.3 % (Palma-López et al. 2017), y presentan la mayor cantidad de baterías de separación (todas pertenecientes al municipio de Huimanguillo), no fue considerado en este trabajo, por ser un grupo de suelos que casi todo el año están inundado. Estos suelos se forman en humedales, llamados localmente como pantanos o tembladeras, por lo que prácticamente no puede ser utilizados para ninguna actividad agrícola o ganadera tradicional del Sureste Mexicano (Palma-López et al. 2006; 2007; 2017). Otro de los grupos suelos en donde se encuentran un buen número de baterías de separación (4 en Cárdenas y 2 en Centla) son los Arenosoles. Aunque estos suelos mantienen un excelente drenaje, presentan bajos contenidos nutrimentales, poca presencia de materia orgánica, y la mayor cantidad de sus partículas son arenas gruesas sueltas con muy poca presencia de arcillas y limos, por lo que presentan baja humedad aprovechable para los cultivos. Uno de los problemas que presentan es su topografía, con pendientes fuertes, por lo que en la costa del estado se ocupan principalmente para cultivo de cocos y pasturas.

Por otra parte, aún que pueden sufrir salinización por un derrame de aguas congénitas, este efecto es probablemente temporal, ya que, las sales son lavadas por la alta precipitación en el clima tropical monzónica del área de estudio y la alta conductividad hidráulica del suelo. Igualmente, aunque se sufriera una salinización, no es posible que sufran un efecto sódico, debido

a que presentan tan pocas arcillas (que podrían dispersarse por el sodio). Por estas razones, no fueron considerados en la parte experimental de este estudio (Palma-López et al. 2007; 2017).

Los suelos Alisosles (como los Acrisoles), son suelos de terrazas, del Pleistoceno, típicamente. Son suelos ácidos con problemas de baja fertilidad, cuyo uso principalmente son para pastizales y plantaciones forestales (Palma-López et al. 2017). En el área de estudio, la mayoría de los Alisoles son rojizos (férricos) y tienen uso similar a los Acrisoles. Los Acrisoles son profundos, moderadamente bien drenados, con una permeabilidad interna que varía de rápida a moderada. Presentan un horizonte subsuperficial enriquecido en arcillas, contiene aluminio, fósforo y son fuertemente húmicos por su buena cantidad de materia orgánica de acuerdo con Palma-López 2006. Estos suelos son conocidos localmente como “sabanas” o “sabanales”. Cabe mencionar que su uso más común es para pastizales con pastos nativos e introducidos, así como para el cultivo de cítricos, mango, yuca, piña y maíz, así como para otros cultivos tolerantes a la acidez (Palma-López et al. 2006; 2007; 2017).

Por el contraste de estos tipos de suelos (de terraza) con los suelos de aluviones (Fluvisoles, Vertisoles, Gleysoles y muchos Cambisoles), así por la relativa abundancia de baterías de separación ubicadas en ellos, fueron seleccionados para la parte experimental de este estudio. Se encontraron una cantidad igual de Alisoles y Acrisoles con baterías de separación (cuatro en cada unidad), y debido a la mayor abundancia de trabajos realizados previamente sobre los Acrisoles contaminados (Adams, 2013; De la Cruz Morales, 2014; Montero Vélez, 2016), y literatura disponible, fueron seleccionados para continuar la parte experimental de este estudio.

En cuanto a los suelos Cambisoles también presentaron una cantidad considerable de instalaciones (3 Cárdenas y 2 Cunduacán). Son suelos que no han terminado de formarse, y presenta apenas un ligero desarrollo de sus horizontes. Estos suelos están en constante evolución

edáfica, por lo que su contenido de nutrientes varía, sin embargo, su uso más frecuente es para pastizales (Palma-López et al. 2007; 2017). Es común que manifiestan características similares a otros suelos cercanos, pero en términos de clasificación, no hay suficiente desarrollo de horizontes diagnósticos para su ubicación en otra clase de suelo definido. En el área de estudio se encuentra típicamente en los aluviones, cerca de Fluvisoles, Vertisoles y a veces Gleysoles, sin poder clasificarlos en ninguna de estas unidades. Para la parte experimental del presente estudio se decidió mejor considerar los suelos más parecidos a estos en el área y en donde también se encuentran una cantidad importante de baterías de separación (los Fluvisoles).

Por su parte, los Fluvisoles son considerados como los mejores suelos, muy productivos. Se localizan en forma paralela a los cauces de los ríos y arroyos, presentan alta permeabilidad, son profundos, de texturas medias o medias sobre gruesas, ricos en nutrientes y materia orgánica, además presentan un buen drenaje superficial. Son un tipo de suelo bastante usado para cultivos de cacao, maíz, frijol, papaya, plátano, cítricos, así como para pastizales (Palma-López et al. 2007; 2017).

Los suelos Gleysoles son profundos, están saturados con agua durante buena parte del año, su manto freático es somero, y poseen un alto contenido de materia orgánica y nutrientes. Por su naturaleza son recomendados para actividades pecuarias, forestales y también reservas silvestres, pero es muy frecuentes su uso para cultivos de maíz usando la tumba-roza y quema, y para pastizales resistentes a la humedad del suelo (Palma-López et al. 2007; 2017).

Por lo tanto, los grupos de suelos seleccionados para este estudio fueron: Acrisoles, Fluvisoles y Gleysoles. En extensión estos suelos representan el 40.63 % del territorio tabasqueño, ocupando el primer (Gleysoles), tercero (Fluvisoles) y cuarto lugar (Acrisoles) con el 20.5 %, 10.4 %

y 9.73 % respectivamente (Palma-López et al. 2017). Esto grupos de suelos son los más productivos, y son utilizados para la mayoría de las actividades agrícolas.

8.2 Caracterización de agua congénita en el estudio

El agua congénita extraída de la batería Jujo tuvo las siguientes características;

Tabla 2 Características del agua congénita de la batería de separación jujo.

pH	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Sólidos totales disueltos (mg/L)	Hidrocarburos totales (mg/L)
5.4	152.1	230	13.45

6.2 Caracterización de los suelos utilizados en el estudio

Los suelos antes de ser usados para el diseño experimental fueron caracterizados (Tabla 3) obteniendo resultados que indican el estado de estos suelos en condiciones normales (sin afectación alguna).

En el caso de los Gleysols la humedad de campo es bastante elevada, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 la densidad aparente es elevada, una capacidad de campo que favorece la fertilidad del suelo, el pH es medianamente alcalino, respecto a la CE el valor se considera mínimo.

Por su parte los Fluvisols son un tipo de suelo al que se le atribuyen buenas condiciones de fertilidad sus características evaluadas lo hacen ver como un suelo apto para el desarrollo agrícola, tiene buena capacidad de campo, un pH prácticamente neutro, una mínima conductividad eléctrica.

Lo que respecta al suelo Acrisol es muy notable la acidez que presenta, así como una capacidad de campo reducida respecto a los otros suelos.

Tabla 3 Características de los suelos en el estudio.

Tipos de suelos	Humedad (%)	DR (g/cm³)	DA (g/cm³)	CC (%)	pH	CE (ds/cm)
Gleysol	32.95	2.78 (±0.069)	1.006 (± 0.015)	36.77? (±1.29)	7.92 (±0.04)	1.65 (±0.23)
Fluvisol	28.13	2.27 (0.11)	1.13 (±0.023)	32.51? (±2.23)	7.23 (±0.075)	2.05 (±0.96)
Acrisol	19.64	2.46	1.13 (±0.021)	(±3.15)	4.98 (±0.03)	3.09 (±2.042)

8.3 Salinidad en Suelo contaminado con Agua congénita

La salinidad se mide por la Conductividad Eléctrica (CE), normalmente en la pasta saturada preparada del suelo, en unidades de dS/m. Esto se basa en la suposición de que cuando hay más iones (sales), habrá mayor conductividad eléctrica (y visa-versa). La salinidad tolerada depende del cultivo. Generalmente, un nivel de < 4 dS/m se considera seguro para la mayoría de los cultivos (Bohn et al. 2001). Sin embargo, se ha observado que, para ciertos forrajes, especialmente pastizales, se puede tolerar hasta 6 dS/m sin mucho problema, y algunas pasturas pueden tolerar hasta 10 dS/m, pero con menor productividad (Oklahoma Corporation Commision 2006). La manera en que la salinidad variaba en los diferentes suelos, según las tasas de aplicación de aguas congénitas se presenta en la Figura 6.

En el Fluvisol, la salinidad incrementaba gradualmente hasta valores de $\sim 30 - 55$ dS/m con concentraciones de agua congénita de 13 - 67%, y se incrementó hasta ~ 70 dS/m con 100% agua congénita. Según estos datos, la cantidad de agua congénita que se podría tolerar, y aún estar aceptable para pasturas (~ 6 dS/m) era $< 1\%$. Es decir, que cuando el suelo es contaminado con 1% de agua congénita o más, el nivel de salinidad subirá por arriba de la tolerancia de la mayoría de las pasturas.

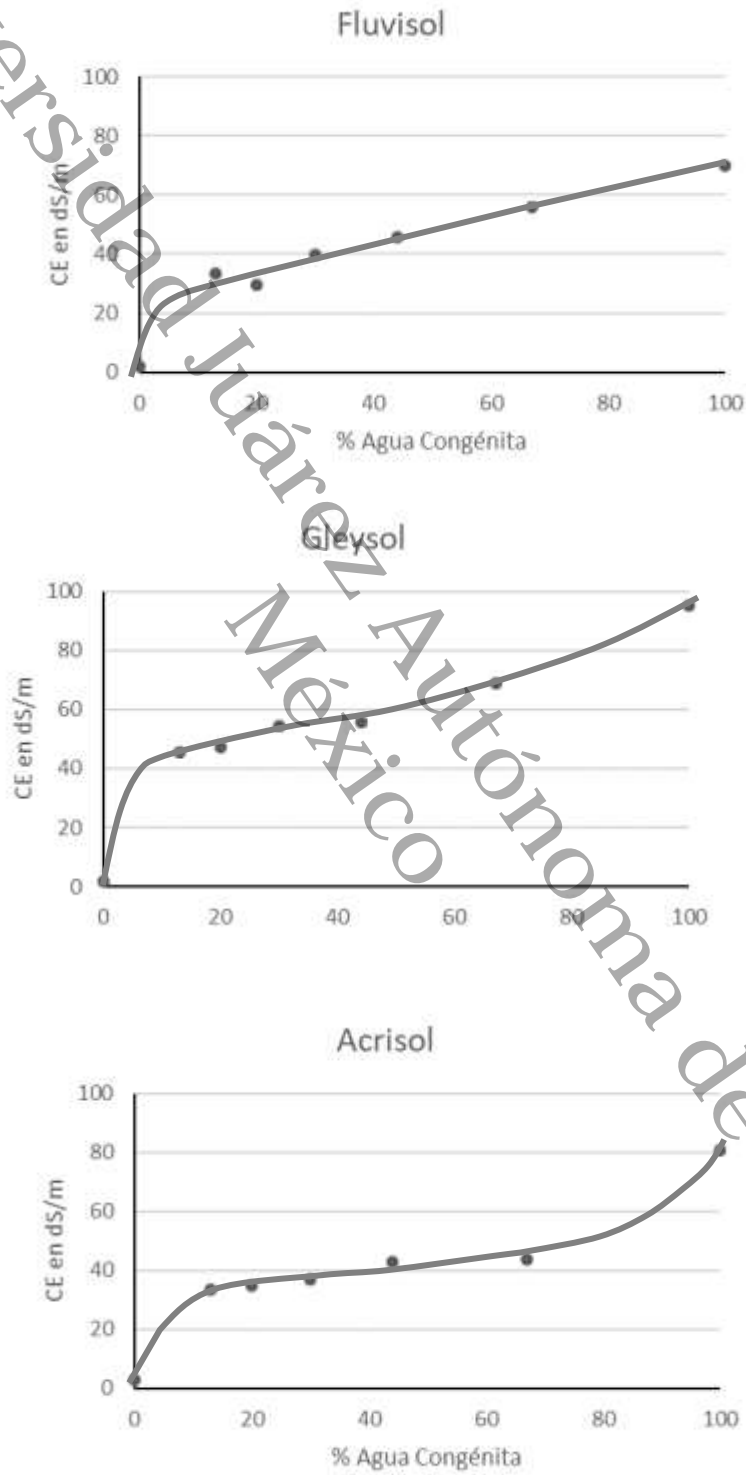
En el Gleysol, se encontró un comportamiento en los datos similar, pero con mayor incremento, hasta $\sim 45 - 70$ dS/m con 13 - 67% de agua congénita, y hasta ~ 95 dS/m con 100% agua congénita. Según estos datos, en este suelo, como en el Fluvisol, será necesario ser expuesto a $< 1\%$ agua congénita para evitar problemas de salinidad en las pasturas.

En el Acrisol, el comportamiento de los datos era similar al Fluvisol, en que entre 13 - 67% de agua congénita los valores de salinidad eran menores, en el rango de 33 - 43 dS/m, y solo

incrementaba hasta 80 dS/m con 100% agua congénita. De acuerdo con estos datos, en este suelo se encontró un poco más de resistencia a la salinidad, tolerando hasta 1% de agua congénita sin causar problemas para pasturas, como se demuestra en la Figura 6.

Aunque los datos sobre el Gleysol indicaron que sería el suelo más impactado, estas relaciones fueron derivado de datos obtenidos en el laboratorio – en el campo las condiciones podrían ser diferentes. Sobre todo, con respecto al Gleysol, debido a su tendencia de ser inundado frecuentemente, es probable que el exceso de salinidad sería diluido y lavado, especialmente durante la estación de lluvias de verano y en la estación de nortes, en invierno. Durante la estación de estiaje, que se manifiesta en los meses de verano en el clima tropical monzónico del área de estudio, la probabilidad de sufrir problemas de salinidad sería mucho mayor.

Figura 6 Relación entre la cantidad de agua congénita aplicada al suelo y la salinidad de los diferentes tipos de suelos.



Igualmente, el Fluvisol tiene algunas propiedades que podrían mitigar un derrame de agua congénita. Sobre todo, la textura intermedia y la cantidad relativamente alta de materia orgánica – estos elementos ayudan a desarrollar una buena estructura favoreciendo un buen drenaje interno, para contribuir a la lixiviación de las sales en exceso. Esta característica, en conjunto con una buena fertilidad en general (buena nutrición, CIC, etc.) podría ayudar de manera significativa en la recuperación post-derrame (Palma-López et al. 2006).

Al contrario, el Acrisol no se percibe tan afectado como el Gleysol, pero sí presenta varias características que pueden interferir con su recuperación post-derrame. Entre ellos, su textura areno-arcillosa (que limita el drenaje interno, y la lixiviación de excesos de sales), así como problemas de acidez, toxicidad por aluminio, y baja disponibilidad de fósforo (Palma-López et al 2006). Estas condiciones limitan la fertilidad y el mantenimiento de una cobertura vegetal, y como consecuencia, una mayor probabilidad de erosión y hasta la pérdida del horizonte superficial del suelo.

8.4 Sodicidad en Suelo Contaminado por agua congénita (PSI)

Típicamente, se trata de evaluar la posibilidad de impactos por sodicidad en suelos afectados por sales por una de dos maneras. En la primera, se determinan las proporciones de iones intercambiables, en específico, sodio vs. calcio+magnesio (NaX vs $\text{CaX} + \text{MgX}$), y desde ahí, se calcula la Relación de Sodio Intercambiable, RSI ($= (\text{NaX}) / (\text{CaX} + \text{MgX})$), en $\text{mmol}(+) / \text{Kg}$. Subsecuentemente, con el valor calculado de RSI, se calcula el Porcentaje de Sodio Intercambiable, PSI ($= (100 * \text{RSI}) / (1 + \text{RSI})$). También, se puede calcular el PSI directamente, de las determinaciones de NaX y CIC, calculado el NaX como un porcentaje del CIC ($\text{PSI} = (\text{NaX} / \text{CIC}) * 100\%$). El rango de

sodio intercambiable que puede haber en el suelo, sin afectar a la estructura del suelo varía entre suelos, pero generalmente, los edafólogos consideran que a un $PSI \leq 15\%$, hay poco riesgo de la desintegración de agregados (University of California, Davis 2002; SEMARNAT, 2002).

En estas determinaciones, puede haber muchos tipos de errores analíticos relacionados a la exclusión aniónica en suelos arcillosos, una lixiviación incompleta de la sal índice durante la determinación de CIC, y entrapamiento durante la recuperación de la solución de la sal índice, así como la lixiviación de cationes del mineral zeolita en ciertos suelos. Por tal razón, algunos investigadores consideran que puede ser más exacto hacer una estimación de PSI por un método indirecto, en vez de la medición directa de cationes intercambiables (Bohn et al. 2001).

El segundo método, indirecto, se desarrolla con la determinación de sodio soluble, y la suma de calcio+magnesio soluble (Na^+ vs $Ca^{+2} + Mg^{+2}$), y estos datos son utilizados para calcular la Relación de Adsorción de Sodio ($RAS = (Na^+)/((Ca^{+2} + Mg^{+2})/2)^{1/2}$, en $mmol(+)/Kg$). Para calcular el PSI es necesario saber o estimar el coeficiente de Gapon ($= K_G = RSI/RAS$, y $RSI = K_G * RAS$). Del valor de RAS se calcula el PSI usando la ecuación indicada en el párrafo anterior. Para muchos suelos, el valor exacto del coeficiente de Gapon no es conocido, pero de acuerdo al US Salinity Laboratory (USSL 1954, Bohn et al. 2001), para la mayoría de los suelos es aproximadamente = 0.010 a 0.015. En el presente estudio el valor del coeficiente de Gapon fue determinado empíricamente (ver Anexo A.3.), y después usando en la ecuación ($RSI = K_G * RAS$) para calcular el RSI, y desde ahí el PSI ($= (100 * RSI) / (1 + RSI)$). Las relaciones correspondientes entre la cantidad de agua congénita usada y el PSI se presentan en la Figura 7.

En esta figura se puede observar que, en el Fluvisol, el valor de PSI incrementaba más despacio que en los otros suelos, solo llegando a un nivel más o menos estable a 30% de agua congénita, y en el rango de $\sim 55 - 65\%$ PSI, aun cuando se agrega 100% de agua congénita.

Con respecto al Gleysol, se puede observar que el PSI subía a este mismo rango rápidamente, con solo 13% de agua congénita. Igualmente, con concentraciones de agua congénita por arriba de 67%, se incrementó aún más, hasta 70% PSI.

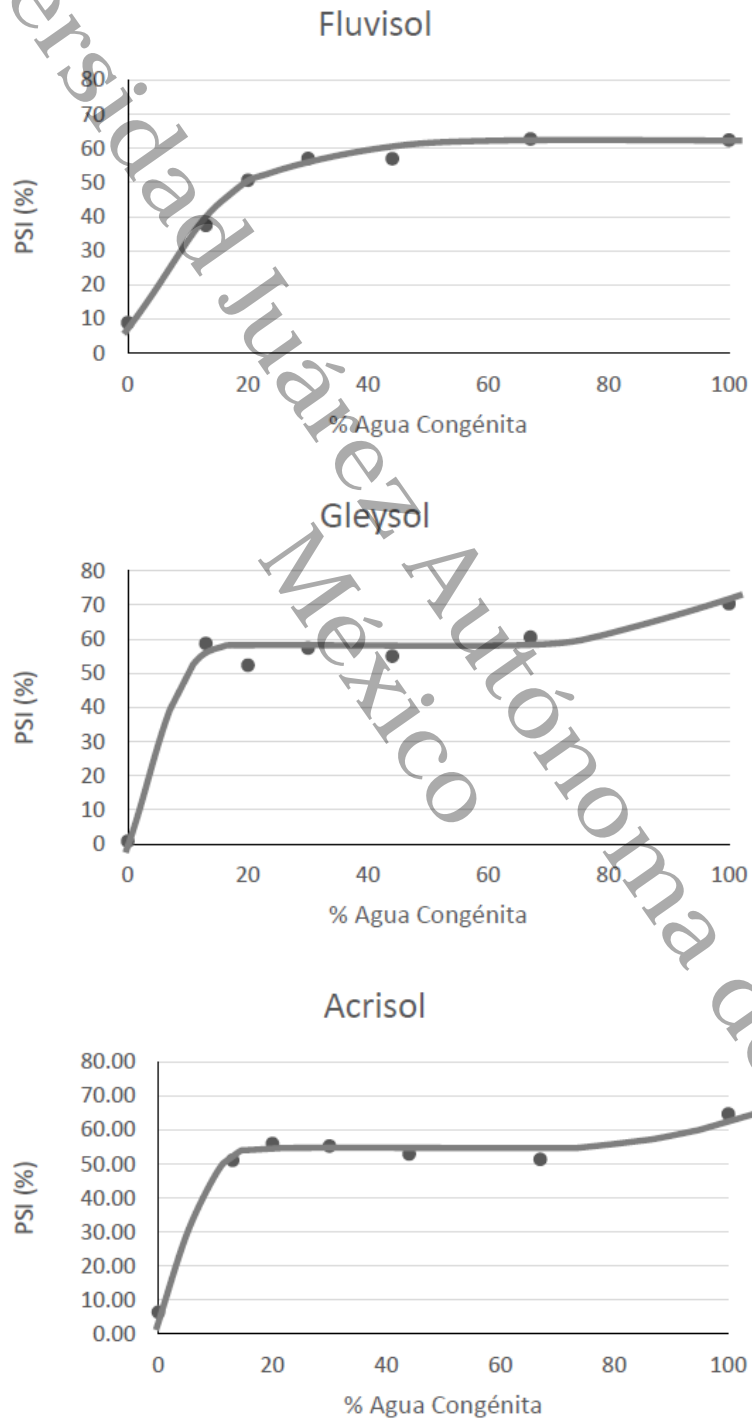
Con el Acrisol, la forma de la relación entre el porcentaje de agua congénita vs. PSI era muy similar al Gleysol. Sin embargo, entre 13 y 67% de agua congénita el PSI era un poco menor, ~54%, y con 100% de agua congénita solo incrementó hasta 65% PSI. En este sentido, era similar al Fluvisol, con la excepción de que subió a un nivel de PSI más o menos estable con menos agua congénita (13% vs. 30% con el Fluvisol).

De acuerdo con estas observaciones, se puede concluir que el Fluvisol puede ser el menos vulnerable, seguido por el Acrisol y con el Gleysol siendo el más vulnerable. No obstante, esta relación fue determinado solo con datos del laboratorio. En el campo las condiciones pueden ser muy diferentes. Esto es especialmente probable con el Gleysol. Debido a su ubicación en el paisaje, este tipo de suelo es un receptor de escurrimientos desde áreas adyacentes. Esto tiende a causar inundación y podría resultar en el lavado de las sales en exceso. Esta característica del suelo podría realmente hacer de este tipo de suelo el menos vulnerable. Sin embargo, esto dependería de la estación del año cuando ocurre un derrame. En el clima tropical monzónico del área de estudio, la estación de estiaje de la primavera será mucho más problemática que la estación de lluvias de verano o la estación de nortes.

El Fluvisol también tiene varias propiedades que podrían mitigar la contaminación con agua congénita y ayudar en la recuperación. Típicamente, estos suelos son fértiles, con una cantidad alta de materia orgánica, y tienen una buena textura que permite un drenaje interno bueno. Todos estos atributos pueden resultar en el lavado natural y recuperación de la cobertura vegetativa, una vez que la salinidad y sodicidad se reducen suficientemente.

El contrario ocurre con el Acrisol, que no beneficia de condiciones tan favorable. Los Acrisoles tienden a tener relativamente baja fertilidad, baja CIC, son acídicos, demuestran toxicidad por aluminio y tienen problemas con la disponibilidad de fósforo. Además, es común que sufran de problemas de erosión debido a las pendientes pronunciadas en donde se encuentran (terrazas, lomeríos). Frecuentemente, esto causa la pérdida del horizonte superficial (horizonte A) y lo que queda tiene menos materia orgánica. Una vez que estos suelos son contaminados, es probable que estos problemas de fertilidad se vuelvan más graves, y sería más urgente e importante que se realice un programa de tratamiento. Idealmente, esto consistiría en un tratamiento de intercambio catiónico, con un post-tratamiento que consista en la adición de enmiendas orgánicas y la siembra de vegetación tolerantes a la salinidad. Esto ayudaría en establecer una cobertura vegetal y evitar la erosión.

Figura 7 Relación entre la cantidad de agua congénita aplicada en el suelo y la sodicidad



Por otra parte, la presencia de arcilla caolinita en estos tipos de suelo tienden a dispersarse en una condición sódica, causando el taponamiento de los poros del suelo, reduciendo el drenaje interno, penetración de raíces, y, por ende, provocando erosión (Ward y Oades 1993). Esto se puede observar en la Figura 6. Una inspección detallada de las funciones graficadas indicó que para mantener la sodicidad en un rango seguro (< 15% PSI), aprox. 2-3% de agua congénita sería tolerado en el Fluvisol, alrededor de 2% en el Gleysol, pero solo aprox. 1% en el Acrisol. Por lo tanto, aunque este suelo parece ser menos impactado en términos de salinidad (la cantidad total de iones en la solución del suelo), fue más impactado por la sodicidad, por lo menos con cantidades bajas de agua congénita. Sin embargo, a concentraciones de agua congénita más alta (p.ej. a 67% de agua congénita), la situación es algo invertido, con el Acrisol siendo el menos afectado (PSI = 51 PSI), mientras que el Fluvisol y Gleysol, ambos presentaron valores en el rango de 61 – 63 PSI.

Cabe mencionar que el daño potencial a la estructura del suelo (debido a esta sodicidad) se debe al intercambio de los cationes divalentes y el sodio en el suelo - $(CaX + MgX) + Na^+ \rightarrow (Ca^{+2} + Mg^{+2}) + NaX$, que podría resultar en la dispersión de las arcillas y la desintegración de las partículas del suelo (agregados), resultando en la pérdida de la estructura del suelo, su porosidad, drenaje interno, y finalmente, escurrimiento superficial de agua pluvial y la erosión del suelo.

7. Conclusiones

En el presente estudio se han visto la ubicación de los diferentes tipos de suelos respecto a las baterías de separación, los efectos de salinidad y sodicidad en los suelos contaminados con agua congénita, así como la interpretación de estos datos en términos de su ubicación en el paisaje y las propiedades intrínsecas de los suelos en términos de textura y fertilidad. Un resumen de los resultados se presenta a continuación para una interpretación más integral.

Tabla 4 Ubicación de las baterías de separación con las observaciones de suelos.

Parámetro	Tipo de suelo	Valor	Observaciones
Ubicación de baterías de separación	Acrisoles/ Alisoles	44% de sitios vulnerables (excluyendo Histosoles, Arenosoles)	Los Acrisoles y Alisoles son de los más vulnerables en este sentido.
	Fluvisoles y Cambisoles con propiedades flúvicas	39%	Pero los Fluvisoles y Cambisoles (flúvicas) son casi igual de vulnerables.
	Gleysoles	17%	Los Gleysoles son mucho menos probables de experimentar un derrame de aguas congénitas.
			Vulnerabilidad: Acrisol \geq Fluvisol > Gleyisol

Teniendo en cuenta la ubicación de las baterías de separación, se pudieron conocer las características físicas y químicas de los suelos identificados como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 características físicas del suelo.

Tipo de suelo	pH	CE	PSI	Observaciones
Gleysol	Alcalino	Muy fuertemente Salino	Salinos sódicos	Basado únicamente en los datos de laboratorio, el Gleysol es mucho más vulnerable, seguido por el Fluvisol y después de Acrisol.
Fluvisol	Alcalino	Muy fuertemente salino	Salinos sódicos	Vulnerabilidad: Gleysol > Fluvisol > Acrisol
Acrisol	Acido	Muy fuertemente salino	Salinos sódicos	A concs. de agua congenita menor, el PSI del Fluvisol es un poco menor que el Gleysol. El PSI del Acrisol y bastante menos. Vulnerabilidad: Gleysol ≥ Fluvisol > Acrisol

Tabla 6 Vulnerabilidad de los suelos.

	Tipo de suelo	Grado de vulnerabilidad
Factores Mitigantes /Exacerbantes	Acrisol	<p>Aunque este fue el menos afectado en laboratorio, en campo se presentan varios problemas que podrían exacerbar los efectos, por ejemplo, acidez, baja P disponible, toxicidad por aluminio, erosión del horizonte A (por pendientes y mal manejo) textura arcillo-arenoso. En el corto plazo, podría ser de los menos afectados, pero debido a sus propiedades intrínsecas ya mencionadas, si no son atendidos enseguida, se podrían presentar problemas graves, incluyendo la pérdida total de cobertura vegetal y erosión del horizonte superficial. Adicionalmente, más de 40% de los sitios potencialmente vulnerables se ubican en Acrisoles o Alisoles.</p>
	Fluvisol	<p>Aunque era el segundo más vulnerable en laboratorio, su buena textura, estructura, cantidad de materia orgánica, capacidad de campo y nutrición tiende a ayudar la lixiviación de los excesos de sales y mantener una cobertura vegetal. Aun así, casi 40% de los sitios potencialmente vulnerables se ubican en Fluvisoles o Cambisoles con propiedades flúvicas. Por tal razón se considera de los más vulnerables, sobre todo de corto plazo.</p>
	Gleysol	<p>Aunque era el más afectado en laboratorio, en campo es más probable la inundación y lavado de exceso de sales relativamente</p>

		<p>rápido. Es menos probable que existan afectaciones graves al mediano largo plazo. Podría haber más afectaciones temporales, sobre todo si el derrame ocurre en un periodo de estiaje. Por otra parte, solo 17% de los sitios potencialmente vulnerables se ubican en los Gleysoles.</p>
--	--	--

En esta comparación de varios aspectos, se observa que es más probable que un derrame de agua congénita ocurra en un suelo de terraza (Acrisol/Alisol) o un aluvión (Fluvisol/Cambisol), que un sitio inundable (Gleysol). Sin embargo, respecto al comportamiento antes del derrame, parece que por lo menos en el corto plazo, un Acrisol (y se supone que los Alisol también, suelos de terraza) sufrirían menor impacto que los otros suelos. Sin embargo, si no se atiende de manera puntual, es el tipo de suelo más probable de tener problemas en su recuperación (debido a su textura arcillo-arenoso, y su baja fertilidad), posiblemente sufriendo erosión del horizonte superficial del suelo. Al contrario, los suelos de zonas bajas, como el Gleysol, son menos probable de experimentar un derrame desde un principio, pero si el derrame ocurre en un periodo de estiaje, es el más probable de sufrir daños en el corto plazo. Sin embargo, debido a su nivel bajo en el paisaje, es muy probable que los excesos de sales se laven relativamente rápido (en semanas o meses) y se recupera naturalmente pronto. Los suelos de aluviones (como Fluvisoles y probablemente Cambisoles con propiedades flúvicas) son casi igual de probable de experimentar un derrame de agua congénita como los suelos de terraza, pero en el corto plazo menos resistente a la salinidad y la sodicidad. Un derrame de aguas congénitas en este tipo de suelo tiene el potencial de causar grandes impactos en la producción agropecuaria, sobre todo si no es atendido con urgencia. No obstante, si se logra mantener una cobertura vegetal y evitar mucha dispersión

de las arcillas, es un tipo de suelo que podría recuperar naturalmente debido a su buena estructura y fertilidad.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

8. Bibliografía

Adams R. H. (2013). Evaluación integral de la contaminación del suelo con hidrocarburos del petróleo. TAB-2009-C18-121493. FONDO MIXTO CONACYT – TABASCO. Informe Técnico Final. Villahermosa, Tabasco. Cancino, L. O. A., Sandria, F. J. M., & Arredondo, J. A. A. (2019). Oportunidades de inversión en campos petroleros maduros. *Prospectus. Tendencias y Escenarios para la Educación Superior*, (3), 67-74. <https://prospectiva.uv.mx/index.php/prospectiva/article/viewFile/45/40>

Adams R. H. (2013) Evaluación integral de la contaminación del suelo con hidrocarburos del petróleo. TAB-2009-C18-121493. FONDO MIXTO CONACYT – TABASCO. Informe Técnico Final. Villahermosa, Tabasco. Cancino, L. O. A., Sandria, F. J. M., & Arredondo, J. A. A. (2019). Oportunidades de inversión en campos petroleros maduros. *Prospectus. Tendencias y Escenarios para la Educación Superior*, (3), 67-74. <https://prospectiva.uv.mx/index.php/prospectiva/article/viewFile/45/40>

Aguilera, N. y Domínguez I. (1989). Metodología de análisis físico-químicos de suelos. México, D.F. Facultad de ciencias de la UNAM.

<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/8314/2.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

Anglés, M., Bocco, G., Cotler, H., Cram, S., Lee, W. H., Ortiz, S., Prado, B., Reyes, L. B., Saniger, J. M., Siebe, Ch. (2021). *Por una gestión sostenible del suelo que promueva su reconocimiento, recuperación, preservación y gobernanza*. Vol. 2. Recuperado de https://sdsnmexico.mx/wp-content/uploads/2021/05/Booklet_P2_Suelo_08-Una-pagina.pdf

Bohn H.L., McNeal B.L., O'Connor, G.A. (2001). *Soil Chemistry* (3rd Ed.) John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.

Clark, C. E., & Veil, J. A. (2009). *Produced water volumes and management practices in the United States* (No. ANL/EVS/R-09-1). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).

Dawoud, H. D., Saleem, H., Alnuaimi, N. A., & Zaidi, S. J. (2021). Characterization and Treatment Technologies Applied for Produced Water in Qatar. *Water*, 13(24), 3573.

De la Cruz Morales, L. A. (2014). *Evaluación integral y sistemática de la contaminación de un suelo Acrisol con petróleo crudo*. [Tesis, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México].

Derby, N. E., Casey, F. X., & DeSutter, T. M. (2016). Effects of oil field brine wastewater on saturated hydraulic conductivity of smectitic loam soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 96(4), 496-503.

Hedar, Y. (2018). Pollution impact and alternative treatment for produced water. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 31, p. 03004). EDP Sciences.

Intagri S.C (2019) Los Factores de formación del suelo
<https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/los-factores-de-formacion-del-suelo>

Khader, E. H., Mohammed, T. J., Mirghaffari, N., Juzsakova, T., & Abdullah, T. A. (2021). *Removal of Organic Pollutants from Produced Water by Batch Adsorption Treatment*.

Montero-Vélez, J. P. (2016) Rendimiento vegetal y actividad microbiana en suelos contaminados por petróleo en el Trópico mexicano. [Tesis, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México]

- Morales-Bautista, C., Domínguez-Rodríguez, V., & Adams, R. H. (2011). Estudio cinético del intercambio catiónico con Ca(OH)_2 y evaluación de la fertilidad en un suelo arcilloso contaminado con aguas congénitas. *Bioagro*, 23(2), 129-134.
- Muñoz Iniesta D. J., Soler Aburto A., López Galindo F. y Hernández Moreno M. (2013). Edafología, Manual de métodos de análisis de suelos. UNAM, Facultad Iztapalapa, p. 91-96
http://portal.cuautitlan.unam.mx/manuales/Edafologia_practicas_laboratorio.pdf
- Palma-López D. J., Cisneros D., Moreno C. y Rincón-Ramírez, J. A. (2006). *Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco*. 3ª. Ed. ISPROTABFUNDACION PRODUCE TABASCO-COLEGIO DE POSTGRADUADOS, ISBN: 968-839-319-3, Villahermosa, Tabasco, México.196 p.
- Palma-López D. J., J. Cisneros D., E. Moreno C. y J. A. Rincón-Ramírez. (2007). *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable*. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. 197 p.
- Palma-López, D. J., Jiménez-Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi-Reyes, F., & Palma-Cancino, D. Y. (2017). *Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México*. *Agro Productividad*, 10(12), 29-35.
- Porta J., López-Acevedo M., Poch R.M. (2013). *Edafología Uso y protección de suelos*. 3ra edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 608 p.
- Pulido, L. L. (2011). Trenes de Tratamiento para Agua de la Industria Petrolera. *Kuxulkab'*, 17(33).
- Oklahoma Corporation Commission, 2006. Summary Guidance for Cleanup Levels, Brine Spills. OCC Oil and Gas Division, Oklahoma City, OK. USA.
<http://occeweb.com/Divisions/OG/newweb/salinity%20%20cleanup%20brochure%20page%202.doc>.

- Rodríguez-Rodríguez, N., Rivera-Cruz, M. C., Trujillo-Narcía, A., Almaráz-Suárez, J. J., & Salgado-García, S. (2016). Spatial distribution of oil and biostimulation through the rhizosphere of *Leersia hexandra* in degraded soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(9), 1-14.
- Schoonover, J. E., & Crim, J. F. (2015). An introduction to soil concepts and the role of soils in watershed management. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 154(1), 21-47.
- Schollenberger, C. J. y Simon, R.H., (1945). Determination of Exchange Capacity and Exchangeable Bases in Soil-Ammonium Acetate Method. *Soil Science*, 59, 13-24.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP] 2019. Infografía Agroalimentaria Tabasco. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado de: <http://osiap.org.mx/senasica/sites/default/files/Tabasco-Infografia-Agroalimentaria-2019.pdf>
- Sistema de Información Energética (2021) Producción de crudo por Activosa. Petróleos Mexicanos. Secretaria de Energía. Disponible en línea en: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cveca=PMXB1C05> (consultado en febrero 8, 2022)
- Servicio Geológico Mexicano [SGM] (2017) Yacimientos petroleros. Museo Virtual. Aplicaciones de la geología. Disponible en línea en: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicacionesgeologicas/Yacimientos-petroleros.html> (consultado en febrero 8, 2022)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2005) NOM-143-SEMARNAT-2003. Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de aguas congénitas asociadas a hidrocarburos
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/DO561.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Publicado en el Diario Oficial de la Federación 31 de diciembre de 2002, México, D.F.

Torres, F., & Rojas, A. (2018). El suelo agrícola en México: retrospectiva y prospectiva para la seguridad alimentaria. Realidad, datos y espacio. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 9(3).

Torres Guerrero, Carlos Alberto, Gutiérrez Castorena, Ma. Del Carmen, Ortiz Solorio, Carlos Alberto, & Gutiérrez Castorena, Edgar Vladimir. (2016). Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 457-466. Recuperado en 27 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000400457&lng=es&tlng=es.

University of California, Davis. 2020. Salinity Measurement and Unit Conversion. Division of Agriculture and Natural Resources, University of California, Davis, Regents of the University of California

https://ucanr.edu/sites/Salinity/Salinity_Management/Salinity_Basics/Salinity_measurement_and_unit_conversion.html.

US Salinity Laboratory Staff (USLL). 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. United States Department of Agriculture. *Handbook* 60.

Ward P.R., Oades J.M. 1993. Effect of clay mineralogy and exchangeable cations on water repellency in clay-amended sandy soils. *Aus. J. Soil Res.* 31(3)351-364.

9. Anexos

Sección A.1. Requerimiento de cada tipo de suelo para el análisis de CIC.

El análisis de CIC en este proyecto se realizó siguiendo diferentes estrategias, debido a las condiciones que presentaron cada tipo de suelo. El Fluvisol mantiene buena estructura, buen drenaje y una cantidad considerable de materia orgánica, además sus partículas son de tamaño medio y fino. Por lo que la cantidad requerida fue un 50% más respecto a la cantidad que solicita el método. Por su parte el suelo Acrisol tiene características de acidez, alta cantidad de arcillas y una baja cantidad de materia orgánica, tuvo un comportamiento en el cual la solución de extracción se saturaba con los cationes extraídos, por lo tanto, se procedió a reducir un 50% la cantidad de muestra para su extracción. El Gleysol es un tipo de suelo que tiene drenaje pobre, una cantidad de arcilla considerable y alguna cantidad de materia orgánica, fue una muestra que se pudo trabajar tal y como lo marca el método.

Sección A.2. Determinación Empírica del Coeficiente de Gapon en tres suelos.

Cualquier método para evaluar la sodicidad en el suelo depende de determinaciones de sodio, calcio y magnesio (en la pasta saturada o en la solución de intercambio). Generalmente, estas se determinan por absorción atómica, que tiene buena precisión y exactitud, pero que requiere la adquisición y mantenimiento de equipo especializado, así como capacitación de personal técnico del laboratorio. En este trabajo de investigación esto no fue disponible. Sin embargo, existen métodos confiables para la determinación de calcio y magnesio (pero no sodio) por titulación (que se describen en el marco teórico). Una vez que los valores de $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$ or $\text{CaX} + \text{MgX}$ se obtienen, desde ahí es posible estimar las concentraciones de Na^+ o NaX bajo ciertos escenarios.

Se ha determinado empíricamente que la proporción de cationes solubles es proporcional a la conductividad eléctrica en la relación que $\text{mmol}(+)/\text{L} = 10 \cdot \text{CE}$ (en dS/m) (Bohn et al. 2001). Esta relación se mantiene hasta por lo menos 30 dS/m (University of California, Davis 2019). Adicionalmente, los cationes en soluciones de suelos afectados por aguas saladas son casi exclusivamente sodio, calcio y magnesio (Bohn et al. 2001). Así, si un suelo tiene, por ejemplo una $\text{CE} = 30 \text{ dS/m}$ en la pasta saturada, el total de cationes será aprox. $300 \text{ mmol}(+)/\text{L}$. Si la suma de calcio y magnesio soluble era, por ejemplo, $100 \text{ mmol}(+)/\text{L}$, por diferencia, la cantidad de sodio será $200 \text{ mmol}(+)/\text{L}$. Con estos valores de sodio, y calcio+magnesio solubles, se puede calcular el RAS ($= (\text{Na}^+)/((\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/2)^{1/2}$, en $\text{mmol}(+)/\text{Kg}$), y desde ahí el valor de RSI y PSI (usando el coeficiente de Gapon).

La relación entre el RAS (determinado por este método) vs. el porcentaje de agua congénita en el Fluvisol (en el presente estudio) se presenta en la Figura A.1. En la figura se puede observar cómo se incrementa el RAS de una manera cuasi-logarítmica mientras se agrega un porcentaje mayor de agua congénita. Si se sabe el coeficiente de Gapon, con estos datos de RAS se puede calcular los valores correspondientes de RSI, como se ve en la Figura A.2. En esta figura se observa como el valor de RSI puede ser ajustado según la selección del valor del coeficiente de Gapon.

Figura A 1 RAS calculado de la CE Y Ca-Mg soluble

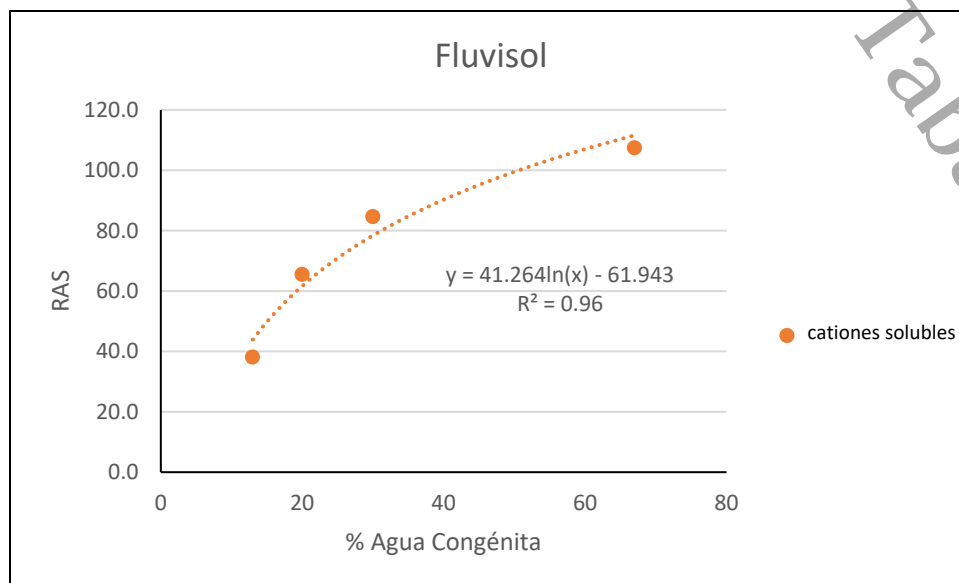
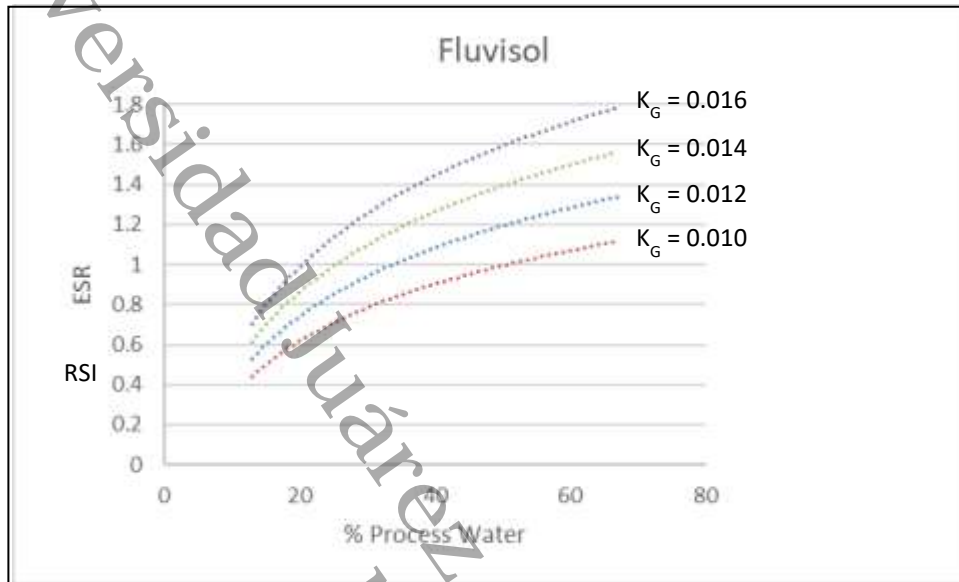


Figura A 2 valores de RSI calculado con el RAS



% Agua Congénita

Figura A 3 valores de RSI calculado para el Fluvisol, utilizando cationes intercambiables.

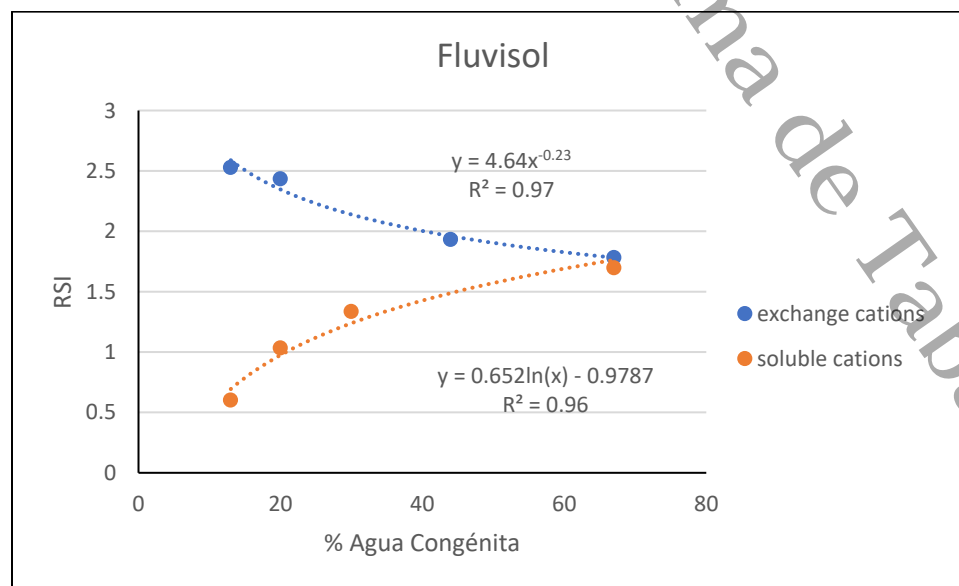
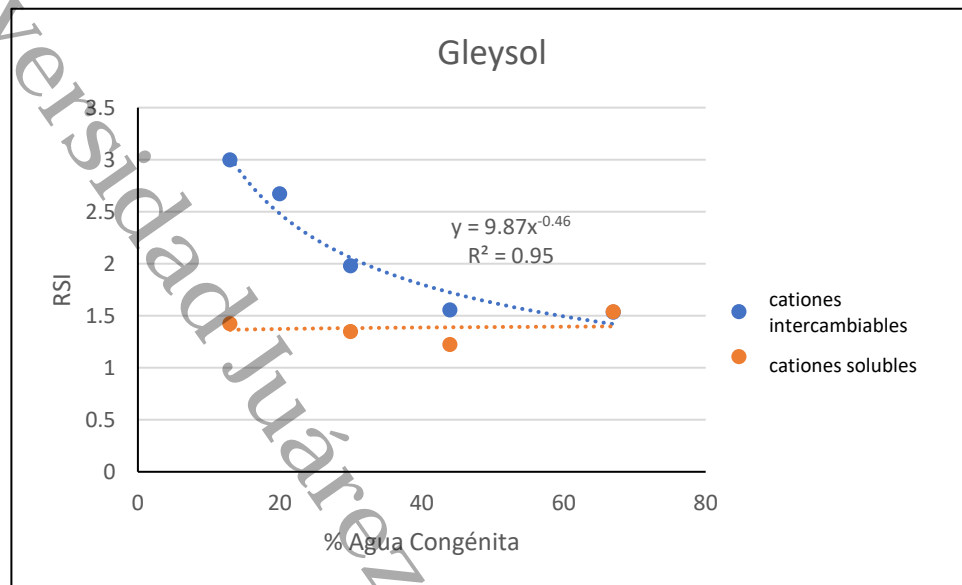


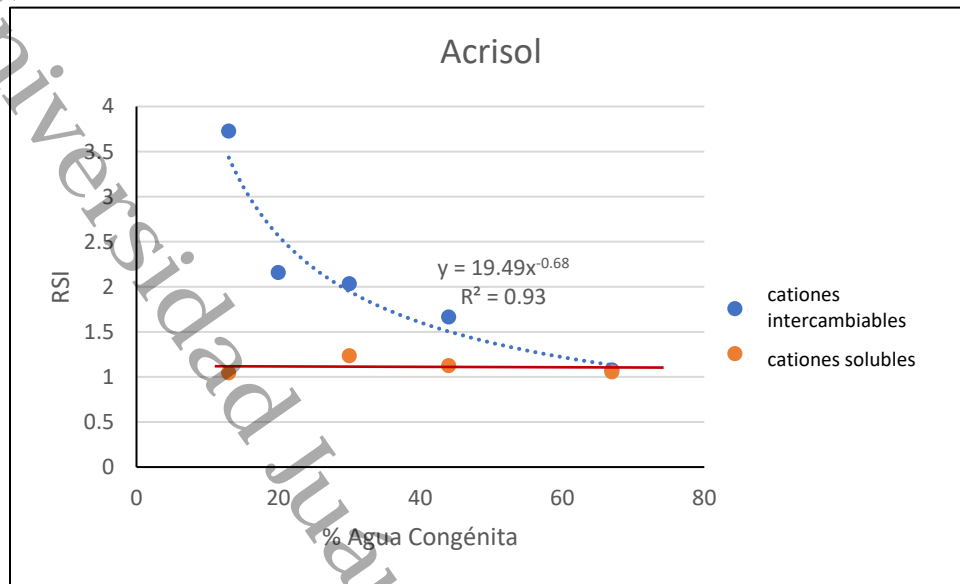
Figura A 2 Valores de RSI calculado para el Gleysol



Otro método que se puede utilizar para estimar NaX es por diferencia entre la CIC y CaX-MgX. Este supone que cuando el suelo está muy impactado por sales hay saturación de bases, y los cationes intercambiables son casi exclusivamente sodio, calcio y magnesio. Por lo tanto, al calcular la diferencia entre la CIC y CaX+MgX, el valor de NaX es determinado. Una vez que se tiene todos los valores para los cationes intercambiables, es posible calcular el RSI y PSI usando las ecuaciones mencionadas previamente. Los valores de referencia de CIC utilizado en estos cálculos son presentados en la Sección A.3.

Estos dos métodos fueron evaluados y comparados, evaluando los valores de RSI obtenido de cálculos basados en cationes intercambiables, así como valores de RSI basado en los cationes solubles. Para el RSI calculado de los datos de cationes solubles se aplicaron diferentes coeficientes de Gapon hasta que había concurrencia con los valores de RSI derivado de los datos con los cationes intercambiables (Figura A3).

Figura A 3 RSI calculado para el Acrisol



En general, usando los datos de los cationes intercambiables, los valores de RSI obtenidos eran muy diferentes de los obtenidos de los datos de cationes solubles. A concentraciones más altas de agua congénita, los valores de RSI fueron reduciendo hasta estar en un rango muy comparable a los determinados con los cationes solubles. Una posible explicación es que las suposiciones utilizadas para la evaluación basadas en cationes intercambiables no se cumplen hasta las concentraciones de cationes son muy altas, con concentraciones en el orden de 67+ % de agua congénita. Es posible que hasta cuando se llega a este nivel de agua congénita, realmente no hay saturación de bases. Por lo tanto, el cálculo de sodio intercambiable, que es basado en la diferencia entre la CIC y la suma de $\text{NaX} + \text{MgX}$ se sobre estima, y por consecuencia el valor de RSI, basado en el valor de NaX también se sobre estima. Usando diferentes valores del coeficiente de Gapon para que los valores de RSI coinciden con los dos métodos (cationes solubles, cationes intercambiables) con 67% de agua congénita dio como resultado estimaciones de los valores de K_G de 0.0158, 0.0109, y 0.0124 para el Fluvisol, Gleysol y Acrisol, respectivamente. En este análisis, los valores de suelos no contaminados no fueron incluidos debido a que tuvieron condiciones muy

diferentes de las suposiciones utilizadas en las ecuaciones. De igual manera los valores de suelos con 100% agua congénita no fueron incluidos debido a la baja confiabilidad de los datos de CIC y RAS a esta concentración. Por otro lado, caso por caso, algunos datos no representativos (valores atípicos) fueron excluidos del juego de datos (de los con 20 y 30% de agua congénita) para obtener tendencias más congruentes a las encontradas en la literatura técnica y científica. Sin embargo, una comparación de los valores de RSI determinado por cada método, para suelo contaminado con 67% de agua congénita se demuestra en la Tabla A.S.1.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

Tabla A.1. Concurrencia de valores de RSI derivados de datos de cationes intercambiables y solubles.

Suelo	RSI por Cationes Intercambiables	RSI por Cationes Solubles	Coefficiente de Gapon (K _G)	Coincidencia	Observaciones
Fluvisol	1.764	1.763	0.0158	99.9 %	Concurrencia de regresiones no-lineales (potencial y logarítmica)
Gleysol	1.533	1.537	0.0109	99.8 %	Concurrencia de regresiones no-lineales (potencial y logarítmica)
Acrisol	1.117	1.115	0.0124	99.8 %	Concurrencia de regresión de cationes intercambiables (potencial) con promedio de valores entre 13 – 67% agua congénita para cationes solubles (nota: en este rango hubo poca variación).

Como se observa en esta tabla, las concurrencias con esta concentración de agua congénita (67%) eran excelentes (> 99%), mostrando alta confianza en los valores de los coeficientes de Gapon determinado por este método. Estos valores fueron utilizados para calcular el RSI del SAR y, subsecuentemente, el PSI del RSI. Esto para comparar las vulnerabilidades de los tres tipos de suelo por sodicidad. Cabe mencionar que estos valores también son muy cerca a los reportado en la literatura (generalmente entre 0.010 – 0.015, según Bohn et al. 2001).

Sección A.3. Valores de referencia de CIC usados para calcular RSI

En la Tabla A.2. se presentan los valores promedios de CIC para cada suelo según el porcentaje de agua congénita aplicada, así como los valores CIC de referencia para los cálculos de RSI.

Tabla A.2. Promedios de CIC vs. porcentaje de agua congénita aplicada a cada suelo

% agua congénita	CIC (cmol(+)/Kg)			Valores de referencia de CIC usado cálculo de RSI (cmol(+)/Kg)					
	Gleysol	Fluvisol	Acrisol	Gleyso	Observaciones	Fluvisol	Observaciones	Acrisol	Observaciones
0	40.7	41.1	13.55	--	dependencia	--	de curva	--	uso de valor
13	32.2	38.1	--	32.2	a muy	39.4	generada	14.7	promedio**
20	30.5	40.9	14.6	30.5	regular de	38.8	a por	14.7	*
30	27.8	30.6	16.2	27.8	CIC con pH	38.0	inter-	14.7	
40	26.8	40.1	14.32	26.8	y CE, uso	37.3	pretació	14.7	
67	25.8	34.3	--	25.8	de datos	36.6	n gráfica	14.7	
100	28.7	38.7	15.1	--	directos*	--	y	--	
							aplicand		
							o juicio		
							profe-		
							sional**		

Notas: datos de 0% y 100% agua congénita no fueron utilizados para calcular el RSI debido a mucha más variabilidad comparado con los demás datos existentes.

*La relación entre CIC vs. % Agua Congénita era muy regular en el Gleysol – se usaron los datos directos.

**La relación entre CIC vs. % Agua Congénita en el Fluvisol mostró la misma tendencia como en el Gleysol, pero era más variable en el Fluvisol. Por esta razón la curva generada gráficamente con el Fluvisol, pero basado en la tendencia observado con el Gleysol, fue usado.

***No se observe una relación o tendencia entre el CIC vs. % Agua Congénita, realmente hubo poca variación en este rango, tal como se usó el valor promedio.

En las Figuras A.6., A.7. y A.8. se observan gráficamente el comportamiento de CIC vs. % Agua Congénita para cada suelo.

Figura A 6 Relación entre CIC y % de agua congénita

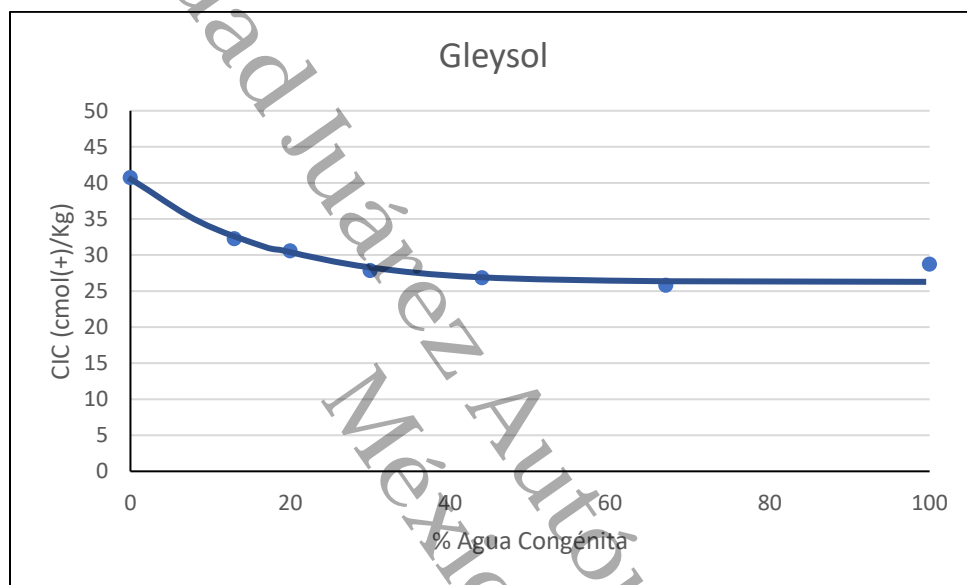


Figura A 7 relación entre CIC y porcentaje de agua congénita en Fluvisol.

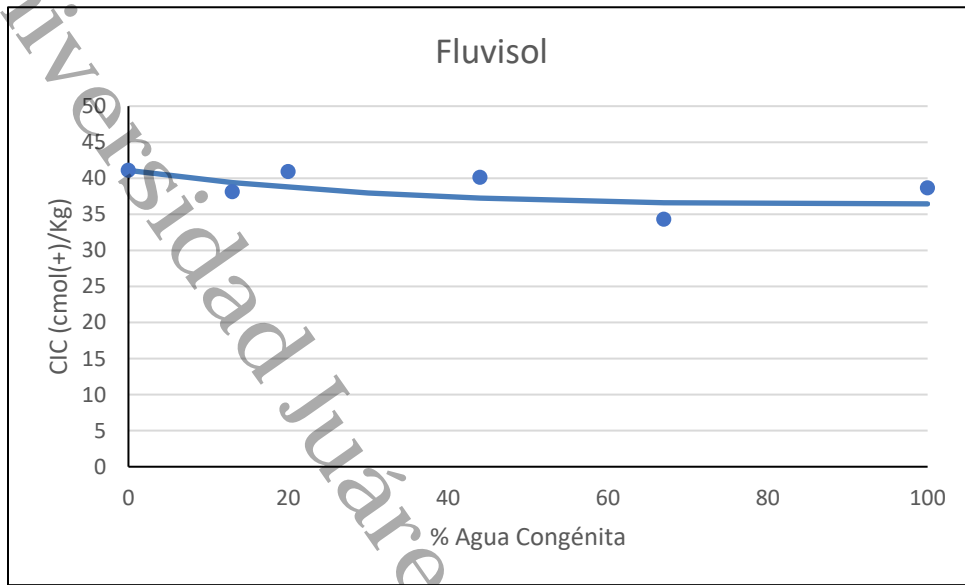
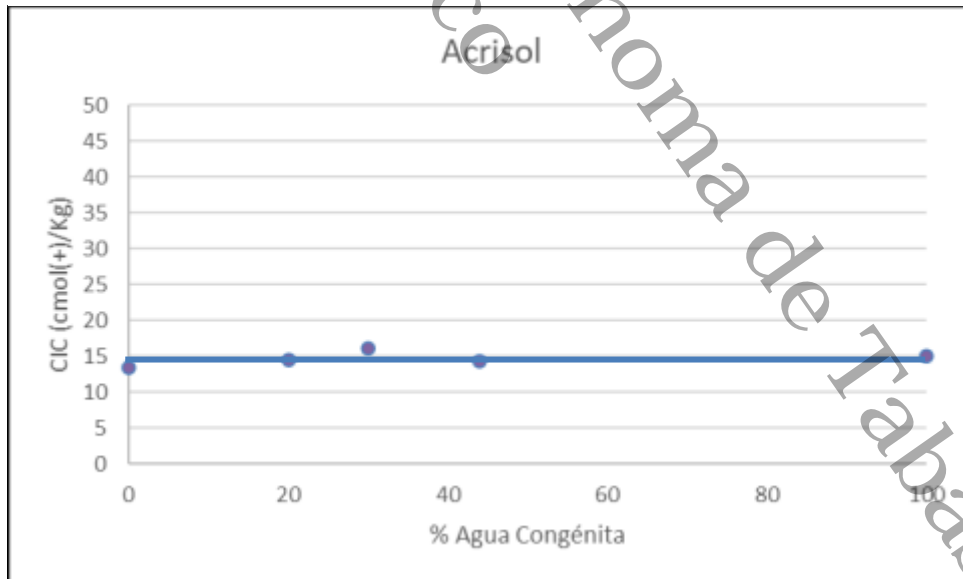


Figura A 8 Relación entre CIC y porcentaje de agua congénita en Acrisol



Sección A.4. Datos de Cálculos de RSI de Cationes Intercambiables

En las Tablas A.3 – A.5. se presentan los datos utilizados para el cálculo de RSI de cationes intercambiables:

Tabla A.3. Datos para Fluvisol

% agua congénita	CIC de referencia (cmol(+)/Kg)	(CaX + MgX) (cmol(+)/Kg)	(NaX) (cmol(+)/Kg) por diferencia	RSI
0	41.1	7.7	33.3	--
13	39.4	11.2	28.2	2.53
20	38.8	11.3	27.5	2.43
30	38.0	13.7	24.3	1.77
44	37.3	12.7	24.5	1.93
67	36.6	13.2	23.4	1.78
100	36.5	14.2	22.2	--

Table A.4. Datos para Gleysol

% agua congénita	CIC de referencia (cmol+)/Kg	(CaX + MgX) (cmol+)/Kg	(NaX) (cmol+)/Kg por diferencia	RSI
0	40.7	5.1	35.6	--
13	32.2	8.1	24.2	3.00
20	30.5	8.3	22.2	2.67
30	27.8	9.3	18.5	1.98
44	26.8	10.5	16.3	1.55
67	25.8	10.2	15.6	1.53
100	28.7	13.7	15.0	--

Table A.5. Datos para Acrisol

% agua congénita	CIC de referencia (cmol(+)/Kg)	(CaX + MgX) (cmol(+)/Kg)	(NaX) (cmol(+)/Kg) por diferencia	RSI
0	14.7	1.2	13.5	--
13	14.7	3.1	11.6	3.73
20	14.7	4.7	10.1	2.16
30	14.7	4.9	9.9	2.03
44	14.7	5.5	9.2	1.66
67	14.7	7.1	7.6	1.08
100	14.7	11.4	3.4	--

Sección A.5. Datos de Cálculos de RSI de Cationes Solubles

En las Tablas A.6. – A.8. se presentan los datos utilizados para el cálculo de RSI de cationes solubles.

Tabla A.6. Datos para Fluvisol

% agua congénita	CE (dS/m)	(Ca ⁺ + Mg ⁺) (mmol(+)/L)	(Na ⁺) (mmol(+)/L) por diferencia	RAS	RSI (K _G = 0. 0158)
0	2.1	8.1	13	6.2	--
13	33.2	84.5	247	38.1	0.60
20	30.1	33.5	268	65.5	1.03
30	39.6	36.1	360	84.6	1.34
44	45.7	47.1	410	84.4	1.33
67	56.1	46.0	515	107.4	1.70
100	70.1	70.7	630	106.0	--

Tabla A.7. Datos para Gleysol

% agua congénita	CE (dS/m)	(Ca ⁺ + Mg ⁺) (mmol(+)/L)	(Na ⁺) (mmol(+)/L) por diferencia	RAS	RSI (K _G = 0.0109)
0	1.7	14.5	2.0	0.7	--
13	45.4	21.9	432.0	130.5	1.42
20	47.2	37.2	434.6	100.8	1.10
30	54.4	34.0	510.2	123.6	1.35
44	55.6	42.0	514.2	122.2	1.22
67	68.9	42.0	646.7	141.0	1.54
100	95.2	35.4	916.7	218.0	--

Tabla A.8. Datos para Acrisol

% agua congénita	CE (dS/m)	(Ca ⁺ + Mg ⁺) (mmol(+)/L)	(Na ⁺) (mmol(+)/L) por diferencia	RAS	RSI (K _G = 0.0124)
0	3.1	15.5	15.4	5.54	--
13	33.4	26.7	307.4	84.2	1.04
20	34.8	20.5	327.8	102.5	--
30	37.0	24.1	345.4	99.6	1.23
44	43.0	37.4	392.1	90.7	1.12
67	43.8	43.1	394.9	85.1	1.05
100	80.5	52.0	753.2	147.6	--

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México