

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**MORFOLOGÍA Y FERTILIDAD DIACRÓNICA EN SUELOS DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN REGIÓN SECA-SEMIÁRIDA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

P R E S E N T A

VICENTE VIDAL ENCINIA URIBE

Escobedo, N.L.

Septiembre de 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**MORFOLOGÍA Y FERTILIDAD DIACRÓNICA EN SUELOS DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN REGIÓN SECA-SEMIÁRIDA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

P R E S E N T A

VICENTE VIDAL ENCINIA URIBE

Escobedo, N.L.

Septiembre de 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**MORFOLOGÍA Y FERTILIDAD DIACRÓNICA EN SUELOS DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN REGIÓN SECA-SEMIÁRIDA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

P R E S E N T A

VICENTE VIDAL ENCINIA URIBE

Escobedo, N.L.

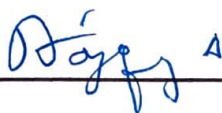
Septiembre de 2022

**ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL
COMITÉ PARTICULAR COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

COMITÉ PARTICULAR



**Dr. Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena
Director**



**Ph. D. Rigoberto Eustacio Vázquez Alvarado
Co-Director**



**Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena
Asesor Auxiliar**



**Ph. D. Emilio Olivares Sáenz
Asesor Auxiliar**

**Dra. Juanita Guadalupe Gutiérrez Soto
Subdirectora de Estudios de Posgrad**

DEDICATORIA

A **Dios Padre** Jehová de los Ejércitos, **Dios Hijo** León de Judá y **Dios Espíritu Santo**, por nunca dejarme solo, protegerme y permitirme concluir con un escalón más en mi formación profesional.

A mis padres **Vicente Encinia Marín** y **Verónica Uribe Martínez** por darme todo su amor, apoyo, paciencia, empatía y todo lo que estaba en sus manos, para ayudarme a concluir mi maestría.

A mi hermana **Vero** y mi cuñado **Russbel** por estar siempre para mí, apoyarme y hacerme sentir un fuerte respaldo.

A mi hermanita **Daniela** y mi sobrinita **Génesis** por todo el amor que me demuestran a diario, y que una vez más, esta tesis sea la prueba de que pueden lograr todo lo que se propongan, siendo constantes en todo y dando siempre lo mejor de sí mismas.

A mi **Papi Viejo (Vicente Encinia García)** por enorgullecerse tanto de mí y por su cariño y apoyo constante.

A mi **Güelita Gela (María de los Ángeles Marín) (†)** que llevo siempre en mi corazón y nunca olvido.... me encantaría que estuvieras aquí güelita, ya subí un escalón más.

A mi **Tío Toño (Marco Antonio Encinia) (†)** por ser tan alegre y chistoso hasta su último día, por darme su cariño y enseñarme que la mejor forma de enfrentar cualquier situación es con una sonrisa, nunca lo olvidaré tío.

A los **nuevos integrantes** de esta escuela del conocimiento y a todos los **jóvenes** hambrientos de saber y ganas de salir adelante, que este trabajo sea un ejemplo de que a veces es más valioso el aprendizaje adquirido en el transcurso de la investigación que los resultados obtenidos de la misma.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi eterna gratitud al Dr. Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena por todas sus enseñanzas, el apoyo incondicional, sus sabios consejos, la confianza depositada en mi persona y desde luego, su valiosa amistad.

Al Dr. Rigoberto Eustacio Vázquez Alvarado, a la Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena y al Dr. Emilio Olivares Sáenz por formar parte del Comité de Tesis, por sus valiosos comentarios, sugerencias, interés y apoyo, para la realización de este trabajo de investigación.

Al pueblo de México y al CONACYT por el financiamiento de mis estudios mediante la Beca Nacional de Posgrado de Calidad.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por la accesibilidad a espacios de trabajo e investigación.

A mis amigos y compañeros Carito Villarreal, Lile Mireles, Tavo Ramírez, Frans Gaytán, la Inge Arlette, Shey Martínez, Dani Guerrero, Rubén García y Pepe Peru por su cariño, las risas, los momentos vividos, el apoyo moral y su ayuda en trabajo de campo para hacer posible y ameno este trabajo. También a mis demás compañeros de maestría y profesores por todo lo vivido durante clases.

A Abigail Ramos por llegar de forma inesperada a mi vida, darme su amor, apoyo incondicional, ser mi escape del estrés y la tensión, y siempre darme ánimos y aliento para continuar con lo que me apasiona.

A la Familia Gutiérrez de la Garza (Edgar, Sra. Rocío, Licha y Citla) por su apoyo, la confianza y nuevamente hacerme sentir como un miembro más de su familia.

A IGASA y todo su personal (Galaguer, Claudio, Edgar, Arturo, Pablito) por el espacio de trabajo, el conocimiento y las experiencias compartidas.

A mis amigos y compañeros del COLPOS (Dr. Carlos Ortiz, Gabriel, Monse y Patricio) por la confianza, enseñanzas y por volver más ameno el tiempo de tensión.

Estimado lector,

Es normal sentirse perdido y pensar que todo tu esfuerzo ha sido en vano, quizá en este momento puedas sentir una gran incertidumbre y puedas pensar que tantos años invertidos no han servido de nada, quizá ahora no sepas que hacer y puedas pensar que realmente no eres tan bueno como lo creías. Permíteme decirte que estas equivocado, y con mucho cariño, te regalo estas palabras de aliento que cuando estuve en tu lugar me dijo un buen amigo:

“Eres una persona de ciencia, tú haces algo que muy pocas personas se atreven a hacer. No todos tienen la llave de oro en sus manos, tú la tienes porque te ha costado mucho, es una llave muy valiosa que tú mismo has forjado con tanto trabajo, no te quedes a mitad del camino y da el siguiente paso”.

Así que no te rindas, ve y busca eso que tanto anhelas, siempre considerando lo mejor para ti. Ve y continua con la intención de hacer un bien a la comunidad, no pierdas ese sueño y ese anhelo de aportar un pequeño granito de arena a la historia de la humanidad, y que tu conocimiento, tus ideas y tu esfuerzo queden inmortalizados en escritos y enseñanzas a través del tiempo.

El camino no es fácil, pero tampoco es imposible, de corazón te deseo el mejor de los éxitos y te comparto lo siguiente, esperando que al igual que yo, encuentres fuerza y ánimo de continuar:

*Filipenses 4:12 Sé vivir humildemente, y sé tener abundancia;
en todo y por todo estoy enseñado, tanto para estar
saciado como para tener hambre, tanto para tener
abundancia como para padecer necesidad.*

Filipenses 4:13 Todo lo puedo en Cristo que me fortalece.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
INDICE DE CUADROS	X
INDICE DE FIGURAS	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Hipótesis General.....	3
1.2. Hipótesis Específica	3
1.3. Objetivo General	4
1.4. Objetivos Específicos	4
2. REVISION DE LITERATURA	5
2.1. Sistemas Productivos en el Noreste de México	5
2.1.1. Agricultura Tradicional de Secano	6
2.1.2. Agricultura Tradicional de Riego	8
2.1.3. Pastizales.....	11
2.2. Perfiles Pedológicos.....	12
2.3. Caracterización de Suelos	13
2.4. Propiedades Físicas del Suelo	16
2.5. Propiedades Químicas del Suelo	17
2.6. Actividad Biológica del Suelo	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1. Área de Estudio.....	22
3.2. Descripción y Muestreo de Perfiles Pedológicos.....	23
3.3. Análisis de Laboratorio.....	23
3.4. Clasificación de Suelos (WRB y Soil Taxonomy)	24
3.5. Morfología Diacrónica	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1. Perfiles Pedológicos.....	25
4.1.1. Perfil de suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Secano	26

4.1.1.1. Clasificación de suelo del sistema tradicional de secano.....	29
4.1.2. Perfil de suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Riego	30
4.1.2.1. Clasificación de suelo del sistema tradicional de riego	33
4.1.3. Perfil de suelo del Sistema de Agricultura Tradicional Pastizal.....	34
4.1.3.1. Clasificación de suelo del sistema pastizal	37
4.1.4. Diferencias Edáficas en los Sistemas Productivos.....	38
4.2. Morfología y Fertilidad Diacrónica	40
5. CONCLUSIONES.....	47
6. LITERATURA CITADA	49
A N E X O S.....	63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro			Página
1	Análisis físicos y químicos del perfil de suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Secano.	....	27
2	Análisis físicos y químicos del perfil de suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Riego.	....	31
3	Análisis físicos y químicos del perfil de suelo del Sistema de Pastizal.	....	35
4	Análisis de perfiles de suelo de sistemas de riego, secano y pastizal.	....	39
5	Clasificación histórica y actual de suelos de los sitios de secano, riego y pastizal (WRB y Taxonomía de Suelos).	....	46
6	Análisis físicos y químicos del perfil de suelo 2 (actual secano).	....	66
7	Análisis físicos y químicos del perfil de suelo 6 (actual riego).	....	67
8	Análisis físicos y químicos del perfil de suelo 10 (actual pastizal).	....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Ubicación del municipio de Marín, Nuevo León	.... 22
2	Sitio del sistema de agricultura tradicional de secano	.... 26
3	Perfil de suelo del sistema de agricultura tradicional de secano	.... 26
4	Propiedades edáficas en suelo agricultura tradicional de secano	.... 27
5	Sitio del perfil de suelo del sistema de agricultura tradicional de riego	.... 30
6	Perfil de suelo del sistema de agricultura tradicional de riego	.... 30
7	Propiedades edáficas en suelo agricultura tradicional de riego	.... 31
8	Sitio del perfil de suelo del sistema pastizal	.... 34
9	Perfil de suelo del sistema pastizal.	.... 34
10	Propiedades edáficas en suelo sistema de pastizal	.... 35
11	Perfiles de suelo en el sistema productivo de riego, secano y pastizal	.... 38
12	Perfiles de suelo actual e histórico. Secano, riego y pastizal	.... 41
13	Datos históricos y actuales de MO, N, P y K del sitio de secano	.... 42
14	Datos históricos y actuales de MO, N, P y K del sitio de pastizal	.... 43
15	Datos históricos y actuales de MO, N, P y K del sitio de Secano	.... 44
16	Perfil de suelo de la serie Marín (Pissani <i>et al.</i> , 1994)	.... 64
17	Perfil de suelo de la serie Zuazua (Pissani <i>et al.</i> , 1994)	.... 65

RESUMEN

En regiones con clima seco-semiárido la producción es limitada por el requerimiento hídrico de los cultivos y la escasa información de los suelos presentes, lo que dificulta la conservación del recurso en predios agrícolas de riego, secano y pastizal. El objetivo fue realizar un estudio diacrónico de las propiedades físicas y químicas de los suelos de los sistemas productivos del noreste de México y clasificarlos para determinar el impacto edáfico del manejo realizado en las últimas tres décadas. Los suelos se muestrearon mediante perfiles pedológicos y a través de sus horizontes genéticos; posteriormente, se caracterizaron y clasificaron (WRB y Soil Taxonomy). Los datos obtenidos se compararon con la información generada por Pissani *et al.* (1994). Los resultados indican que los suelos son medianamente alcalinos (pH 7.6-8), bajos en MO (0.26-2.32%) y altamente calcáreos (20.7-46%) en los tres sistemas productivos. Además, presentaron altas concentraciones de P y K, mientras que el N fue bajo. Los suelos se clasificaron como Calcic Kastanozems (*Aric, Siltic*) y como *Typic Haplocalcids* (sistema de producción de secano); como Cambic Calcisols (*Aric, Chromic, Clayic, Ochric*) y *Ustic Haplocalcids* (sistema de producción Irrigado) y como Haplic Calcisols (*Clayic, Chromic, Ochric*) y *Typic Haplocalcids* (sistema de pastizal). El sitio de secano presentó mejoras en sus propiedades al desarrollar un horizonte móllico al cabo de 30 años. El sitio de pastizal mostró mayor conservación del suelo al contener buena reserva N, P y K y mayor contenido de MO, por otro lado, el sitio bajo riego presentó una ligera degradación al perder propiedades de horizonte móllico, no obstante, el implementar prácticas como labranza mínima o de conservación y aporte de materia orgánica, contribuiría a mejorar la productividad y sostenibilidad del recurso edáfico, cambiando en el futuro la clasificación asignada.

ABSTRACT

In In regions with a dry-semi-arid climate, production is limited by the water requirement of the crops and the scarce information on the soils present, which makes it difficult to conserve the resource in irrigated, dry and pasture land. The objective was to carry out a diachronic of the physical and chemical properties of the soils of the productive systems of northeastern Mexico and classify them to determine the edaphic impact of the management carried out in the last three decades. The soils were sampled through pedological profiles and through their genetic horizons; subsequently, they were characterized and classified (WRB and Soil Taxonomy). The data obtained was compared with the information generated by Pissani et al. (1994). The results indicate that the soils are moderately alkaline (pH 7.6-8), low in OM (0.26-2.32%) and highly calcareous (20.7-46%) in the three production systems. In addition, high concentrations of P and K, while N was low. The soils are classified as Calcic Kastanozems (*Aric, Siltic*) and as *Typic Haplocalcids* (drying production system); as Cambic Calcisols (*Aric, Chromic, Clayic, Ochric*) and *Ustic Haplocalcids* (Irrigated production system) and as Haplic Calcisols (*Clayic, Chromic, Ochric*) and *Typic Haplocalcids* (grassland system). The rainfed site presented improvements in its properties by developing a mollic horizon after 30 years. The grassland site showed greater soil conservation by containing good N, P and K reserves and higher OM content, on the other hand, the irrigated site presented a slight degradation by losing mollic horizon properties, however, implementing practices such as minimum or conservation tillage and contribution of organic matter, would contribute to improve the productivity and sustainability of the edaphic resource, changing the indicated classification in the future.

1. INTRODUCCIÓN

La zona centro y norte del estado de Nuevo León registra un clima seco-semiárido que limita la producción y el rendimiento de los cultivos (gramíneas principalmente), debido al requerimiento hídrico sobre las condiciones edáficas que se presentan en la región, donde predominan los suelos calcáreos.

Nuevo León es un estado que destaca por su actividad ganadera, y predominan los sistemas de producción agrícola de secano, de riego y pastizales, a causa de la alta demanda de materia prima para la alimentación pecuaria y humana. Estos sistemas de producción han mantenido una agricultura tradicional por décadas donde el manejo se determina, en el mayor de los casos, por el conocimiento empírico (Nava *et al.*, 2013; Cerutti, 2019). Por ende, la escasa información detallada de los suelos agrícolas, la falta de asesoría técnica, el manejo inapropiado y la explotación excesiva, ha limitado la productividad y la conservación del suelo en los predios agrícolas (PNUMA, 2002; Palma *et al.*, 2017).

El uso de suelo por la agricultura está limitado por propiedades físicas, químicas y biológicas, que definen su calidad y pueden ser modificadas para expresar el máximo potencial productivo. Las propiedades químicas del suelo determinan la fertilidad; las físicas indican el desarrollo estructural, el arreglo de partículas, el color y la porosidad; y las biológicas hacen referencia a las raíces y a la mesofauna presente (Kumar *et al.*, 2018; Bagherzadeh y Gholizadeh, 2018; Yang *et al.*, 2019; Tunçay *et al.*, 2021).

Entre las propiedades antes mencionadas, la porosidad y las raíces son componentes claves en el desarrollo de sistemas de producción sostenibles, en la conservación y salud del suelo (Baveye *et al.*, 2018; Upton *et al.* 2019). Por lo tanto, la presente investigación plantea y responde los siguientes cuestionamientos:

¿Qué efecto tiene realizar un manejo agrícola tradicional durante tres décadas en suelos de regiones secas-semiáridas?

¿Cuáles son las alternativas para el aumento de la productividad agrícola y la conservación de los suelos en sistemas productivos de riego, seco y pastizales?

¿Los suelos han modificados sus horizontes de diagnóstico? ¿Qué permite que los suelos evolucionen a otros tipos de órdenes o grupos de referencia de acuerdo con los sistemas de clasificación más modernos? La clasificación de suelos contribuye a organizar el conocimiento, recordar sus propiedades y apoyar la transferencia de tecnología y comunicación (Soil Survey Staff, 2014; IUSS Working Group WRB, 2015).

1.1. Hipótesis General

El manejo agronómico en suelos de zonas secas-semiáridas durante las últimas tres décadas ha generado efectos positivos (conservación y sostenibilidad) en epipedones de suelos irrigados y pastizales, pero ha degradado horizontes superficiales en suelos de secano.

1.2. Hipótesis Específica

Las características particulares (físicas y químicas) de los suelos están en función del manejo agronómico que por años se han implementado de cada sistema productivo, esto determina las acciones de conservación a implementar para incrementar o mantener la sostenibilidad de la productividad.

1.3. Objetivo General

Evaluar la morfología y fertilidad diacrónica en suelos de sistemas de producción de riego, secano y pastizales, para determinar el impacto del manejo agronómico sobre el recurso suelo.

1.4. Objetivos Específicos

Clasificar los suelos en tres sistemas de producción y manejo agronómico (producción de riego, secano y pastizal) mediante la WRB y Claves para la Taxonomía de Suelos.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Sistemas Productivos en el Noreste de México

El humano comenzó a practicar la agricultura hace 10 mil años y ha desarrollado e implementado diversos procesos y técnicas para obtener granos mediante acciones de sembrar, cosechar y comercializar con la finalidad de abastecer de alimentos a la población (Loaiza *et al.*, 2014). Así mismo, a través de la historia, la selección de sitios para la producción agrícola ha dependido de factores abióticos como el clima, el suelo y el agua, al determinar la productividad y propiciar las condiciones óptimas para el desarrollo de los cultivos.

El clima es un factor (agronómico y formador de suelo) muy variado, surgiendo la necesidad de ser clasificado con la finalidad de comprender su comportamiento e impacto que genera en una región geográfica (Köppen, 1948). Entre los diferentes tipos de clima que existen destaca el seco-semiárido, caracterizado por tener altas temperaturas, baja precipitación y sequías frecuentes (Yadav y Lal, 2018; Ramarao *et al.*, 2019). Las regiones secas-semiáridas ocupan alrededor del 40% de la superficie terrestre y alojan aproximadamente 2,500 millones de habitantes, donde se lleva a cabo el 50% de la producción de ganado, y aproximadamente el 45% de la producción de alimentos a nivel mundial (Gaur y Squires, 2018).

El noreste de México predomina clima seco-semiárido (García, 2004), región que practica la agricultura tradicional de secano a pequeña escala; no obstante, entre 1930 y 1970 se implementó la idea de la “agriculturización intensiva” del desierto,

razón por la cual, la mayoría de las grandes presas se construyeron en el norte del país (Cerutti, 2019). Esto dio como resultado cuantiosas producciones de alimento, debido a la implementación de riegos en los predios agrícolas de secano. Al mismo tiempo que incrementó la actividad ganadera y con ello, la necesidad de establecer pastizales con dependencia de agostaderos nativos para la alimentación del ganado (Nava *et al.*, 2013).

En la actualidad, se sigue implementando en la zona noreste del país el modelo productivo de revolución verde, el cual se fundamenta en la industrialización de los recursos naturales para la producción de alimento (Loaiza *et al.*, 2012). Los sistemas productivos tradicionales de riego, secano, además de la producción de pastizales, tienen un manejo agronómico específico, a partir de las propiedades edáficas particulares de cada sitio.

La preocupación por la conservación de los recursos se incrementa exponencialmente, lo que obliga a implementar proceso de transición de los sistemas productivos del método tradicional al sostenible (Kimambo *et al.*, 2020; Ye *et al.*, 2022); sin embargo, la falta de información detallada de suelos a nivel regional o nacional aplaza dicha transición.

2.1.1. Agricultura Tradicional de Secano

La agricultura de secano también llamada “de temporal” se identifica por depender de la precipitación media anual de una región, considerando aprovechar la mayor cantidad de lluvia ocurrida durante un ciclo agrícola. La finalidad de este sistema productivo es conseguir que se infiltre la mayor cantidad de agua al suelo, con

posibilidad de retener el mayor tiempo posible para cumplir con el requerimiento hídrico del cultivo (López, 2006).

Los sistemas de producción agrícola de secano ocupan alrededor del 80% del área agrícola de México y son vulnerables a la variabilidad climática, donde el principal problema ambiental son los periodos prolongados de sequía. Particularmente en la zona noreste del país, donde la escasa precipitación media anual que oscila entre los 400 y 1,000 mm (SMN, 2010), y la alta evapotranspiración media anual de alrededor de 2,000 mm, provoca una disminución significativa del rendimiento y calidad de los cultivos (López, 1996; Aeschbach y Gleeson, 2012).

En la zona centro y norte del estado de Nuevo León, los meses que registran mayor precipitación son mayo y septiembre, motivo por el cual, la agricultura de secano se practica principalmente en el ciclo de primavera-verano. Los cultivos que se siembran son maíz, frijol y sorgo, con fechas de siembra del 15 de abril al 31 de mayo, 15 de mayo al 15 de junio, y 20 de junio a 30 de julio (SAGARPA, 2015), respectivamente. La finalidad es aprovechar los eventos de mayor precipitación en las etapas más críticas del cultivo.

Los predios de secano cubren la mayor parte del estado, donde en la mayoría de los casos, la producción es de autoconsumo y la fertilización es mínima o nula al igual que el uso de herbicidas e insecticidas. El manejo general que se emplea es la preparación de suelo utilizando arado y un paso de rastra, la siembra se realiza en surcos y se utilizan principalmente variedades criollas (SAGARPA, 2015). No obstante, ante las condiciones climáticas y buscando efficientizar el aprovechamiento

de la precipitación, así como el aumento del rendimiento de los granos se han realizado modificaciones genéticas para generar variedades cada vez más resistentes a las sequías extremas (López, 2006).

Los escenarios actuales y futuros indican que las zonas secas semiáridas serán cada vez más afectadas por las condiciones climáticas, con altas temperaturas y la escasez de agua (Lawrence *et al.*, 2018). Además, la sobreexplotación y contaminación de los mantos acuíferos en los predios agrícolas de riego pasarán inevitablemente a convertirse en sistemas productivos de temporal (Elliott *et al.*, 2014). No obstante, al ser la agricultura de secano un sistema productivo clave en la producción de alimentos recibirá atención a los cambios que ella presente (Rockström *et al.*, 2010), siendo necesario seguir investigando para establecer estrategias agronómicas del manejo óptimo que eficiente la producción de alimentos en zonas con sequías prolongadas.

2.1.2. Agricultura Tradicional de Riego

La agricultura fue la base de muchas civilizaciones antiguas, al asegurar la alimentación y sustento de su pueblo. Las primeras civilizaciones del mundo se desarrollaron en el Medio Oriente y se asentaron en la ribera de ríos (Nilo, Tigris, Éufrates, Indo, Ganges) con la finalidad de aprovechar el recurso hídrico y garantizar sus cosechas (Esquivel, 2006). Años después, al otro lado del mundo, en la época precolombina, el agua continuó jugando un papel relevante en la agricultura y el desarrollo de civilizaciones como los Mayas, Incas o Mexicas, al realizar sofisticadas obras hidráulicas para captación, conducción, almacenamiento y distribución del

agua. Estos implementaron el uso de terrazas agrícolas que garantizaban el máximo aprovechamiento de la topografía del sitio y del agua; y desarrollaron técnica agrícola de producción, que en la actualidad es considerado como modelo de producción sostenible; por ejemplo: las chinampas (González y Torres, 2014).

El Noreste de México, a diferencia del centro y sur, cuenta con un clima seco semi-árido y no hubo un destacado asentamiento prehispánico y desarrollo agrícola, limitándose a condiciones de secano. No fue hasta los años entre 1930 a 1970 donde se implementó la idea de la “agriculturización intensiva” del desierto, por tres principales razones: a) la amplia extensión territorial de la región árida y semi-árida, b) la escasa población de la zona y c) la cercanía con Estados Unidos de Norteamérica.

La mayoría de las grandes presas se construyeron en el norte del país dando como resultado incremento sustancial en la producción de alimento, al establecer riego (distritos de riego) en los predios agrícolas de secano (Cerutti, 2015; Cerutti, 2019). No obstante, los distritos de riego creados disminuyeron su productividad, debido a la gestión ineficiente del uso y manejo del recurso hídrico a la ineficiente infraestructura. La baja eficiencia en la distribución de agua, volumen excesivo de riego y bajos ingresos para el mantenimiento llevaron al fracaso de estos grandes proyectos, aunado a problemáticas como los periodos prolongados de sequía, el abuso de fertilizantes químicos, la salinización y erosión del suelo (Altamirano *et al.*, 2017; Palerm *et al.*, 2010).

Por otra parte, el estado de Nuevo León reportó 332,825 ha sembradas en el 2019, de las cuales 80,510 ha fueron de riego, o el 24.18% de la superficie total sembrada, en comparación con la producción de secano para el ciclo otoño-invierno (42.3% de riego y 57.7% de secano) (SIAP, 2019). Esta gran superficie agrícola de secano del estado evidencia la escasez hídrica en la región, refleja las condiciones secas semi-áridas y la necesidad de eficientizar el uso del recurso hídrico. Por lo tanto, la agricultura continuará siendo el sector productivo que mayor cantidad de agua consume en el mundo.

Actualmente, el 70% del agua que se extrae se utiliza en sistemas de riego para la producción de alimento (Grafton *et al.*, 2018); sin embargo, algunos factores como el cambio climático, el aumento demográfico y la demanda de alimentos, incrementaron en 10% la extracción de agua para fines agrícolas y 17% la necesidad hídrica de los cultivos (Jordan *et al.*, 2021; Bwambale *et al.*, 2022; FAO, 2022).

Otros factores que influirán en la restricción del recurso hídrico para la agricultura serán la crisis económica, la corrupción y la explotación industrial. Esto limitará drásticamente la producción de alimentos, provocando escasez y aumento en los costos de producción, dificultando la adquisición de productos de la canasta básica y, por ende, el acceso a una alimentación saludable de calidad. Por lo tanto, es primordial el desarrollo de técnicas y propuestas de manejo agrícola eficientes, sostenibles y aplicables en sitios con poca o nula disponibilidad de agua.

2.1.3. Pastizales

El desarrollo de la agricultura intensiva en el noreste del país y el establecimiento de los distritos de riego impulsó el incremento de la actividad ganadera y con esto, la necesidad del establecimiento de pastizales, principalmente de pasto Buffel (*Cenchrus ciliaris*), con dependencia de agostaderos nativos para la alimentación del ganado (Saldivar *et al.*, 2004; Nava *et al.*, 2013). No obstante, la producción de forraje en estas regiones disminuyó considerablemente en época de invierno y sequía. En consecuencia, los ganaderos optaron por implementar alternativas para el alimento del ganado, como forraje henificado, rastrojo y granos de sorgo y maíz, y en ocasiones extremas esquilmos y nopal (Nava *et al.*, 2013).

Otra razón de la reducción de la productividad de pastizales y agostaderos es el mal manejo de la capacidad de carga animal, al causar un sobrepastoreo, ocasionando el abandono de sitios y el cambio de sistema de producción, y pasando de ganadería de libre pastoreo a ganadería intensiva estabulada (Yerena *et al.*, 2014).

En el 2002, se estimó que 95% de los pastizales naturales y 70% de los matorrales a nivel nacional estaban sobrepastoreados, representando un total de 47 millones de hectáreas afectadas y una degradación en 55% de la superficie dedicada a la ganadería del país. El impacto del sobrepastoreo va dirigido directamente a la compactación del suelo y a la pérdida parcial o completa de la cubierta vegetal, lo que posteriormente provoca erosión hídrica y eólica (SEMARNAT-COLPOS, 2002).

La evaluación de la degradación nacional de los suelos no se ha estudiado desde hace 20 años, motivo por el cual no se tiene la certeza del incremento o decremento

de la superficie afectada. Sin embargo, se intuye que en zonas tropicales y subtropicales, los pastizales se han recuperado por las lluvias frecuentes, pero, este proceso está limitado en zonas áridas y semiáridas por la escasez de agua. Por esta razón, es importante considerar el establecimiento de pastos nativos y variedades adaptadas a dichas regiones, que con escasas precipitaciones logren producir rendimientos considerables de forraje, algunos ejemplos son: Pastos Banderita, Navajita y Buffel (INIFAP, 2015).

Asimismo, aunque los pastizales y agostaderos han sufrido deterioro de su potencial productivo por el sobrepastoreo, el cambio de uso de suelo y la degradación, de organismos como las biocostras naturales y la vegetación nativa, contribuyen a mitigar los procesos de degradación del suelo y a la restauración en regiones secas-semiáridas (Molina *et al.*, 2013; Molina *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2020).

2.2. Perfiles Pedológicos

Los perfiles pedológicos se han utilizado como objeto de estudio, al ser el perfil una unidad representativa a escala macroscópica que muestra los procesos pedogenéticos y características generales de los horizontes de diagnóstico. Este es un corte vertical de un suelo que observa los horizontes genéticos que lo componen (Ortiz, 2019).

Los horizontes son capas del suelo que se encuentran paralelas a la superficie de la tierra y que presentan características particulares que son producto de los procesos de formación de suelos (físicos, químicos y biológicos). Además, se puede distinguir

tanto: a) Horizontes genéticos, que expresan un juicio cualitativo acerca de la clase de cambios o procesos que han ocurrido en el suelo; representados con las letras mayúsculas O, L, A, E, B, C, R y W, son utilizadas para designar a los horizontes principales (Falda *et al.*, 2017); como b) Horizontes de diagnóstico que son horizontes conceptualizados a partir de un conjunto de parámetros cuantitativos de las propiedades del suelo, con la utilidad de ser clasificados taxonómicamente (PROY-NOM-021-RECNAT-2000, 2000).

La descripción del perfil contempla los siguientes aspectos: la superficie del suelo, número del estrato y símbolo del horizonte, profundidad, espesor de la capa, transición a la siguiente capa, humedad, color, textura, pedregosidad, estructura, consistencia, concentraciones e inclusiones de origen pedogenético, poros, permeabilidad, raíces, fauna, reacción (pH) y drenaje del perfil (Cuanalo, 1990).

En la actualidad, realizar descripción de perfiles de suelo es una actividad básica en la ciencia del suelo porque se obtiene información detallada y representativa de un sitio o área de estudio para diferentes objetivos entre los cuales destacan mapeos, clasificación taxonómica, estudios de fertilidad, estudios micromorfológicos, captura de carbono, descomposición de materia orgánica, estudios biológicos, entre otros.

2.3. Caracterización de Suelos

El suelo es un cuerpo natural que se encuentra en la superficie de la tierra y que puede variar en profundidad; su importancia se debe a que el ser humano cultiva sus alimentos básicos en él, siendo un recurso natural no renovable muy importante para

el medio ambiente, y representa un factor relevante para el equilibrio ecológico (Porta *et al.*, 2013).

La definición de suelo más completa en la actualidad es: “cuerpo natural formado por sólidos (material mineral y material orgánico), líquidos y gases, que está sobre la superficie de las tierras, que ocupa un lugar en el espacio y que presenta una o ambas de las siguientes características: horizontes o capas que se diferencian del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, migraciones y transformaciones de materia y energía; o, por la habilidad de soportar raíces de plantas en un ambiente natural” (Soil Survey Staff, 2014).

Los suelos presentan características muy particulares que se ven influenciadas y determinadas por los factores de formación (material parental, clima, biota, relieve y tiempo) dependiendo de la región fisiográfica en la que se ubiquen (Jenny, 1941; Akinde *et al.*, 2020). En términos generales, las características del suelo se agrupan en: físicas (indican el desarrollo estructural, el arreglo de partículas, el color y la porosidad), químicas (determinan el estado de la fertilidad) y biológicas (interacción y presencia de mesofauna y raíces) (Kumar *et al.*, 2018; Bagherzadeh y Gholizadeh, 2018; Yang *et al.*, 2019; Tunçay *et al.*, 2021).

El conjunto de las características antes mencionadas otorga la información necesaria para realizar la caracterización y clasificación de suelos, estudios muy importantes que se realizan a partir de perfiles podológicos. Los objetivos que persiguen son: organizar el conocimiento, recordar sus propiedades fácilmente, apoyar la transferencia de tecnología y establecer prácticas agrícolas sostenibles (Ortiz, 2010;

Chaves *et al.*, 2021). También proporcionan información que contribuye a la conservación del recurso y al entendimiento de su relación con el medio ambiente, ayudando a definir las prácticas agrícolas para incrementar el rendimiento de los cultivos. La intención es desarrollar sistemas productivos sostenibles, buscando garantizar la seguridad alimentaria de una nación evitando la degradación del suelo (Fadl y Sayed, 2020; Chaves, *et al.*, 2021; Dinssa y Elias, 2021).

Existen diversas formas de clasificar el suelo, pero en México, las más populares y aceptadas son: la WRB (World Reference Base), que considera dos niveles para caracterizar suelos: el Primer Nivel tiene 32 Grupos de Suelos de Referencia (GSR); el Segundo Nivel, consiste en el nombre del GSR combinado con un conjunto de calificadores principales y suplementarios (IUSS Working Group WRB, 2015); Mientras tanto Soil Taxonomy, toma en cuenta el régimen de humedad y temperatura del suelo y se ordena de forma jerárquica por orden (12), suborden (64), gran grupo (>300), subgrupo, familia y serie (Soil Survey Staff, 2014).

La caracterización y clasificación de suelos determinan aspectos físicos, químicos y biológicos que no se pueden evaluar con muestreos parcelarios tradicionales (Sánchez *et al.*, 2003), por lo que es relevante realizar caracterizaciones más detalladas con nuevos enfoques y tecnología que permita obtener la información necesaria para eficientizar las tomas de decisiones en el manejo agronómico y edáfico de los sistemas productivos con la finalidad de evitar la degradación de los recursos (Villaseñor *et al.*, 2015).

2.4. Propiedades Físicas del Suelo

Las propiedades físicas del suelo se han considerado un factor limitante en la producción de cultivos, al verse afectadas por otras propiedades del suelo y están definidas en gran parte por el manejo agronómico, llevado a cabo en un periodo de tiempo de al menos una década (Brevik *et al.*, 2015; Šimanský *et al.*, 2022). Las características físicas del suelo determinan factores como la resistencia a la penetración, la rigidez, la plasticidad, la capacidad de drenaje y retención de humedad (Rucks *et al.*, 2004). Asimismo, la distribución de tamaño de partículas (textura) o estructura (arreglo de partículas), densidad aparente, consistencia, color, porosidad, permeabilidad y profundidad (Cuanalo, 1990; Ortiz, 2019).

La textura indica la proporción que existe entre arena (2.0-0.05 mm), limo (0.05-0.002 mm) y arcilla (<0.002 mm), o fracción de tierra fina (Partículas <2mm) (Ortiz, 2019). Esta propiedad interviene en la capacidad de retención de humedad, aireación y en la fertilidad al tener influencia en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (FAO, 2016). Por otra parte, el arreglo de partículas en unidades grandes (agregados) influyen en el drenaje, la aeración, el desarrollo radical, la resistencia a la penetración y, por ende, la dificultad o facilidad para la labranza (Ortiz, 2019).

Mientras tanto, la densidad aparente es la relación entre el volumen total y la masa del suelo. La consistencia se refiere al grado de cohesión o adherencia de la masa del suelo. El color es la característica física más fácil de observar en un suelo y puede dar indicios de procesos o propiedades físicas, químicas y biológicas. La permeabilidad es la cualidad del suelo que permite el movimiento de agua o aire. La

profundidad define el espesor del suelo apto para la penetración de las raíces y el desarrollo de la vegetación (Cuanalo, 1990; FAO, 2016; Ortiz, 2019).

La porosidad indica los espacios vacíos del suelo, es decir, el volumen de suelo que no está ocupado por sólidos y puede ser ocupado por aire, agua o nutrientes (FAO, 2016; Ortiz, 2019). Los poros del suelo pueden ser clasificados por su forma, arreglo y tamaño. Algunas de las funciones de la porosidad del suelo son la infiltración del agua y el movimiento de oxígeno hacia la raíz de la planta. Estos procesos ocurren en los macróporos (1-10 μ m); el almacenamiento de agua aprovechable en los mesoporos (50-1000 μ m); y retención y aprovechamiento de elementos en forma reducida como Fe y Mn en los microporos (50-<2 μ m) (Bullock *et al.*, 1999; Amézquita, 2013; Menón *et al.*, 2020).

En términos generales, las propiedades físicas del suelo determinan la capacidad de infiltración del agua, la retención de humedad y nutrimentos, la aireación, el desarrollo radical, la absorción de nutrientes y la estabilidad de agregados (Volverás *et al.*, 2020). Por tal motivo, la calidad física del suelo resulta determinante para el correcto desarrollo de los cultivos, no obstante, estas propiedades son codependientes entre características químicas y biológicas del suelo, y en conjunto determinarán la calidad y salud del suelo (Rucks *et al.*, 2004).

2.5. Propiedades Químicas del Suelo

Las propiedades químicas están estrechamente relacionadas en función de las propiedades físicas del suelo (Calderón *et al.*, 2018). Estas constituyen un conjunto

de interacciones y reacciones que determinan la fertilidad del suelo, la cual se evalúa a partir de los siguientes parámetros: pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), carbono orgánico (CO), conductividad eléctrica (CE), cationes intercambiables (Ca, Mg, K y Na), porcentaje de saturación de bases (PSB), nitrógeno total (N) y fósforo soluble (P) (Yang *et al.*, 2019; Tunçay *et al.*, 2021).

El pH indica la acidez o alcalinidad de un suelo en una escala promedio de 3.5 a 9.5, considerando el 7 como neutro, valores menores como ácido y mayores como alcalino. Esta propiedad es de gran importancia, ya que demuestra la disponibilidad de nutrientes para las plantas, su solubilidad y la actividad biológica, además determina la supervivencia de diferentes tipos de plantas (Ramírez, 1997).

La Capacidad de Intercambio Catiónico hace referencia al total de cargas negativas que se encuentran en la superficie de la parte sólida del suelo, particularmente en las arcillas, materia orgánica o las sustancias húmicas, y mide la cantidad de iones positivos (Ca, Mg, K, Na, etc.) que estas pueden retener. Esta parte es donde se da el intercambio iónico, el cual consiste en intercambiar otros cationes o iones hidrogeno que se encuentran en la solución del suelo. Un suelo con pocas cantidades de arcilla tendrá baja CIC y, por lo tanto, baja capacidad para retener nutrientes. Aportaciones de materia orgánica que contribuyen a incrementar la CIC de un suelo, además de mejorar su estructura y su capacidad de retención de humedad (FAO, 2019).

El calcio (Ca), el magnesio (Mg), el potasio (K) y el sodio (Na) son los cationes básicos y la fracción que ocupan en los coloides del suelo es lo que se conoce como

porcentaje de saturación de bases (PSB). La saturación de bases está relacionada con el pH del suelo, cuando este se encuentra neutro (pH 7), la saturación de bases es 100%, lo que indica que no se encuentran iones H^+ en los coloides (FAO, 2019). El porcentaje de saturación de bases es un dato indispensable para realizar la clasificación de suelos.

Las plantas requieren 16 elementos esenciales para su desarrollo y crecimiento, los cuales se clasifican en macronutrientes (C, H, O, N, P, K, Ca, Mg y S) que se requieren en grandes cantidades y los micronutrientes (Fe, Zn, Mn, B, Cu, Mo, Cl y Ni) en pequeñas cantidades (FAO, 2019). Sin embargo, los micronutrientes, al ser requeridos en cantidades mínimas, en la mayoría de los casos la necesidad se cubre con las reservas que existen naturalmente en el suelo o simplemente se aplican de forma foliar a los cultivos. En el caso de los macronutrientes, en el Noreste de México, los suelos tienen reservas de Ca, Mg y S, que son abundantes debido a la naturaleza del material parental y al contenido en las aguas subterráneas (Gaytán *et al.*, 2021).

Por otro lado, el N, P y K son considerados los macronutrientes más importantes en la fertilidad del suelo y el aprovechamiento para los cultivos, ya que, además de ser requeridos en grandes cantidades, contribuyen al desarrollo general de las plantas. En términos generales, el nitrógeno contribuye al desarrollo del material vegetal (hojas y tallos) de las plantas, el fósforo promueve el crecimiento y fortalecimiento radical y el potasio aporta calidad al fruto producido.

2.6. Actividad Biológica del Suelo

El suelo actúa como un medio para el desarrollo e interacción de organismos vivos, los cuales funcionan como un indicador de calidad. Mientras mayor sea la diversidad biológica, las propiedades físicas y químicas se verán favorecidas; por lo tanto, la salud y calidad del suelo será mejor. Estos organismos se dividen en dos grandes grupos: flora y fauna, que, a su vez, se subdividen en función de su tamaño: Macrofauna (>2 mm: Ratones, topes, lombrices, escarabajos, hormigas, larvas, cochinillas etc.), Mesofauna (0.1-2 mm: Ácaros, colémbolos, etc.), Microfauna (<0.1 mm: Nemátodos, amibas, rotíferos, etc.), Macroflora (>2 mm: Raíces de plantas y musgos) y Microflora (<0.1 mm: pelos radicales, mohos, setas, cianobacterias, actinomicetos, algas, etc.) (Ortiz, 2019).

Otro componente importante que integra las propiedades biológicas del suelo es la materia orgánica (MO), que proviene de los residuos de las plantas y animales y sirve como fuente de energía y nutrimentos para los organismos vivos del suelo. Así mismo, la acumulación de materia orgánica tiene un impacto significativo en las propiedades físicas, químicas y biológicas, que actúa como un mejorador y estabilizador de la estructura del suelo. Además, la MO contribuye a la agregación de partículas, la retención de humedad mejora la infiltración y la disponibilidad de nutrimentos y ayuda a la conservación del suelo al evitar la erosión hídrica y eólica (Ortiz, 2019; Lavelle *et al.*, 2020; Jakab *et al.*, 2022).

Los organismos tienen un efecto directo en las características físicas del suelo, demostrando que las raíces y sus exudados sirven como fuente de nutrición para

microorganismos, ocasionando un efecto positivo en el aumento de la porosidad y fuerte desarrollo y agregación del suelo, así como la protección del carbono y la liberación y transformación de nutrimentos (Milleret, *et al.*, 2009; Colombi y Keller, 2019, Cheik *et al.*, 2019).

La actividad biológica en los suelos depende de dos factores importantes: espacio (rizósfera, detritosfera, bioporos, agregados) y tiempo (horas, días, semanas, meses) al demostrarse que la presencia de dicha actividad (biopelículas) se presenta en puntos calientes (Hotspots) (Gutiérrez *et al.*, 2016; Kooch *et al.*, 2019;), lo que ha revolucionado el conocimiento sobre la distribución microgeoespacial de los organismos.

El estudio de los microorganismos y los componentes del suelo ha sido un área poco estudiada desde el punto de vista interacción del medio con la actividad biológica desde un enfoque macroscópico (Baveye *et al.*, 2018). Sin embargo, en los últimos años se ha observado un gran interés en la comunidad científica por conocer el impacto que puede alcanzar el lograr la comprensión entre los procesos con diferentes enfoques y escalas de observación. La actividad microbiana al contribuir con múltiples beneficios desde el punto de vista ecológico hasta el productivo, así como su capacidad de capturar y transformar CO₂ ambiental, y mitigar el cambio climático, estabilidad de ecosistemas, así como la descomposición y transformación de materia orgánica en nutrientes asimilables para las plantas, conlleva a ser clave en el establecimiento de sistemas productivos sostenibles (Upton *et al.*, 2019).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de Estudio

El estudio se realizó en el municipio de Marín Nuevo León (Figura 1), donde la temperatura varía entre 42 °C y -10 °C, con una media anual de 22 °C. La precipitación media anual oscila entre 500-550 mm y la evaporación media anual en 2,018.7 mm; el régimen de humedad y temperatura del suelo es arídico e hipertérmico respectivamente (SMN, 2010; Nava *et al.*, 2013; Williams *et al.*, 2017).

La selección de sitios consistió en identificar y ubicar los sistemas agropecuarios representativos con el mismo manejo agronómico en las últimas tres décadas. Los sistemas son: a) Agricultura tradicional de riego (25°52'22.1" N, 100°03'29.1" W), b) Agricultura tradicional de secano (25°51'49.7" N, 100°03'36.3" W) y c) Pastizal (25°52'59.6" N, 100°03'06." W).

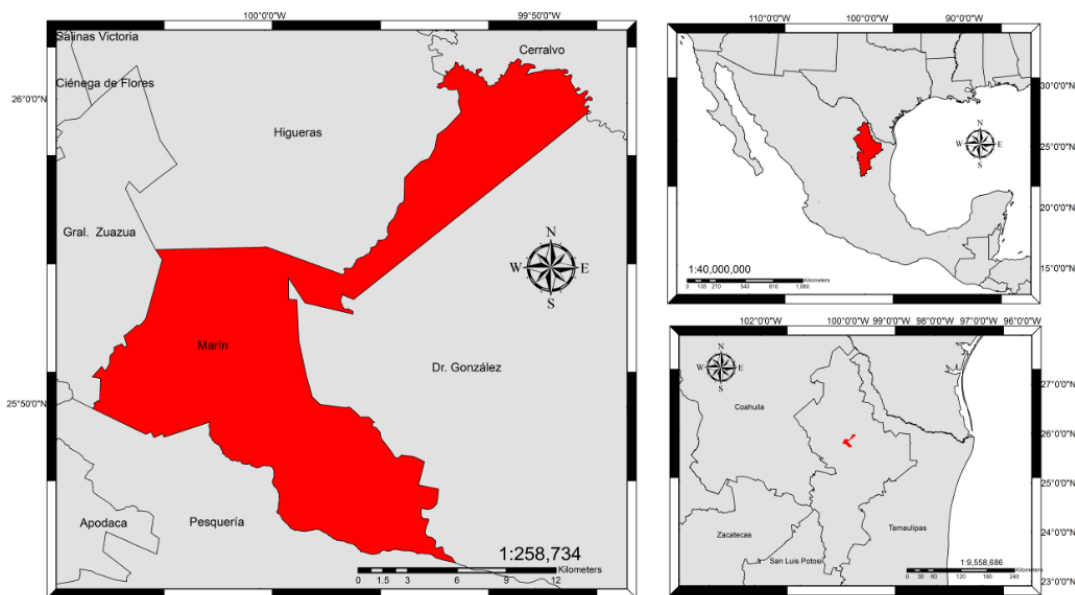


Figura 1. Ubicación del municipio de Marín, Nuevo León.

3.2. Descripción y Muestreo de Perfiles Pedológicos

Los perfiles pedológicos de cada sistema productivo se describieron conforme al manual de descripción de perfiles de suelo (Cuanalo, 1990), donde se colectaron muestras alteradas de los horizontes genéticos para realizar los análisis físicos y químicos.

3.3. Análisis de Laboratorio

Los análisis físicos y químicos se realizaron en el laboratorio de Génesis Morfología y Clasificación de Suelos del Colegio de Posgraduados, Montecillos, México. Las muestras se dejaron secar al aire a temperatura ambiente; posteriormente se tamizaron para obtener la fracción de tierra fina del suelo (<2 mm). Las propiedades analizadas fueron: pH (1:2.5, suelo: agua); carbón orgánico CO y materia orgánica MO (Walkley-Black), capacidad de intercambio catiónico CIC y potasio (K) (acetato de amonio). Además, se determinó el nitrógeno total Nt (micro-Kjeldahl), fósforo soluble P (Olsen), carbonatos de calcio totales CaCO_3 (titulación rápida de Piper); color (carta de colores Munsell), textura (pipeta americana) y densidad aparente Da (método de la probeta). Todas las metodologías fueron extraídas del manual de procedimientos de Van Reeuwijk (2002).

3.4. Clasificación de Suelos (WRB y Soil Taxonomy)

La información recabada de los análisis fue empleada para asignar los horizontes de diagnóstico de cada perfil pedológico; posteriormente, se clasificaron utilizando la Base Referencial Mundial de Suelos (WRB) (IUSS Working Group WRB, 2015) y la Clave para la Taxonomía de Suelos (Soil Taxonomy) (Soil Survey Staff, 2014).

3.5. Morfología Diacrónica

La evaluación de la morfología diacrónica de los suelos de los sistemas de producción de secano, riego y pastizal se realizó comparando los resultados de la descripción de los perfiles y análisis de laboratorio con los datos obtenidos hace 3 décadas por Pissani *et al.* (1994) en los mismos sitios, considerando la misma metodología de descripción y procedimientos de laboratorios.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Perfiles Pedológicos

Los resultados de la descripción de los horizontes genéticos en los perfiles de suelo de cada sistema de producción se reportan a continuación. En ellos se indican datos físicos y químicos obtenidos de los análisis de laboratorio con representación gráfica del comportamiento de la materia orgánica, el nitrógeno, fósforo y potasio, con respecto al incremento en la profundidad. De igual forma, se reporta la clasificación del suelo sobre la base Referencial Mundial de Suelos (WRB) y la Clave para la Taxonomía de Suelos v2014 (Soil Taxonomy), describiendo los criterios considerados para la asignación de cada calificador y grupo de suelo.

4.1.1. Perfil de suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Secano

Localización: 25°51'49.7" N, 100°03'36.3" W

Localidad: Facultad de Agronomía, Marín, N.L.

Elevación: 416 msnm.

Relieve: Plano con pendiente de 2%.

Drenaje superficial: Sitio normal

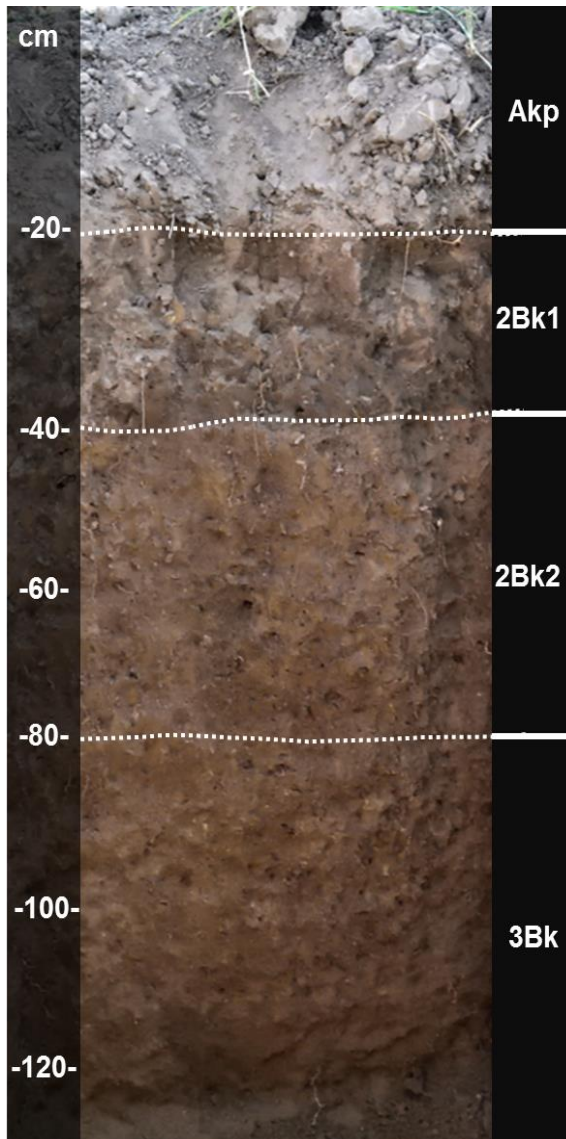
Uso de Tierra: Agrícola, gramíneas de secano

Labranza tradicional.

Material Parental: Sedimentario.



Figura 2. Sitio del Perfil de Suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Secano.



Akp (0-20 cm): Color de suelo en seco 10YR 5/2 (pardo grisáceo), en húmedo 10YR 3/3 (pardo oscuro); textura franco arcillo limoso; estructura de bloques subangulares, moderadamente desarrollada, consistencia en seco muy duro, en húmedo firme; muy pocos poros muy finos dentro de los agregados; comunes raíces medias y gruesas; permeabilidad rápida; reacción moderada al HCl (calcáreo). Transición marcada horizontal.

2Bk1 (20-40 cm): Color de suelo en seco 10YR 5/2 (pardo grisáceo), en húmedo 10YR 3/3 (pardo oscuro); textura franco limoso; estructura de bloques subangulares, fuertemente desarrollada, consistencia en seco muy duro y en húmedo firme; muy pocos poros muy finos dentro de los agregados; pocas raíces delgadas; permeabilidad rápida; reacción fuerte al HCl (altamente calcáreo). Transición marcada horizontal.

2Bk2 (40-80 cm): Color de suelo en seco 10YR 6/2 (gris pardusco claro), en húmedo 10YR 4/3 (pardo); textura franco limoso; estructura bloques subangulares, fuertemente desarrollada, consistencia en seco muy duro, en húmedo friable; frecuentes poros finos; pocas raíces gruesas; permeabilidad rápida; reacción fuerte al HCl (altamente calcáreo). Transición tenue horizontal.

3Bk (80-120 cm): Color de suelo en seco 10YR 6/2 (gris pardusco claro), en húmedo 10YR 4/4 (pardo amarillento oscuro); textura franco arcillo limoso, estructura bloques subangulares, moderadamente desarrollada, consistencia en seco muy duro, en húmedo friable; frecuentes poros finos; comunes raíces delgadas; permeabilidad lenta; reacción fuerte al HCl (altamente calcáreo).

Figura 3. Perfil de Suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Secano.

Cuadro 1. Análisis físicos y químicos del perfil de suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Secano.

Símbolo del horizonte	Profundidad cm	Textura			Clase textural	Da g·cm ⁻³	Color en laboratorio		p H H ₂ O 2:1
		Arena	Limo %	Arcilla			Seco	Húmedo	
Akp	0-20	10.7	59.4	30.0	Franco Arcillo Limoso	1.51	10YR 5/2	10YR 3/3	7.6
2Bk1	20-40	11.1	61.9	27.0	Franco Limoso	1.71	10YR 5/2	10YR 3/3	8
2Bk2	40-80	10.5	64.1	25.4	Franco Limoso	1.40	10YR 6/2	10YR 4/3	8.1
3Bk	80-120	3.0	66.8	30.2	Franco Arcillo Limoso	1.49	10YR 6/2	10YR 4/4	8.1

Símbolo del horizonte	CO %	MO %	CaCO ₃ %	N %	CIC NH ₄ Oc, 1N ⁻⁷ cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	K ⁺ cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	P olsen mgKg ⁻¹	CE dSm ⁻¹	PSB %
2Bk1	0.45	0.77	20.7	0.028	26.08	0.32	11.8	2.41	>100
2Bk2	0.22	0.39	27.3	0.049	32.90	0.26	14.2	1.09	>100
3Bk	0.15	0.26	26.7	0.042	29.29	0.24	19.9	1.18	>100

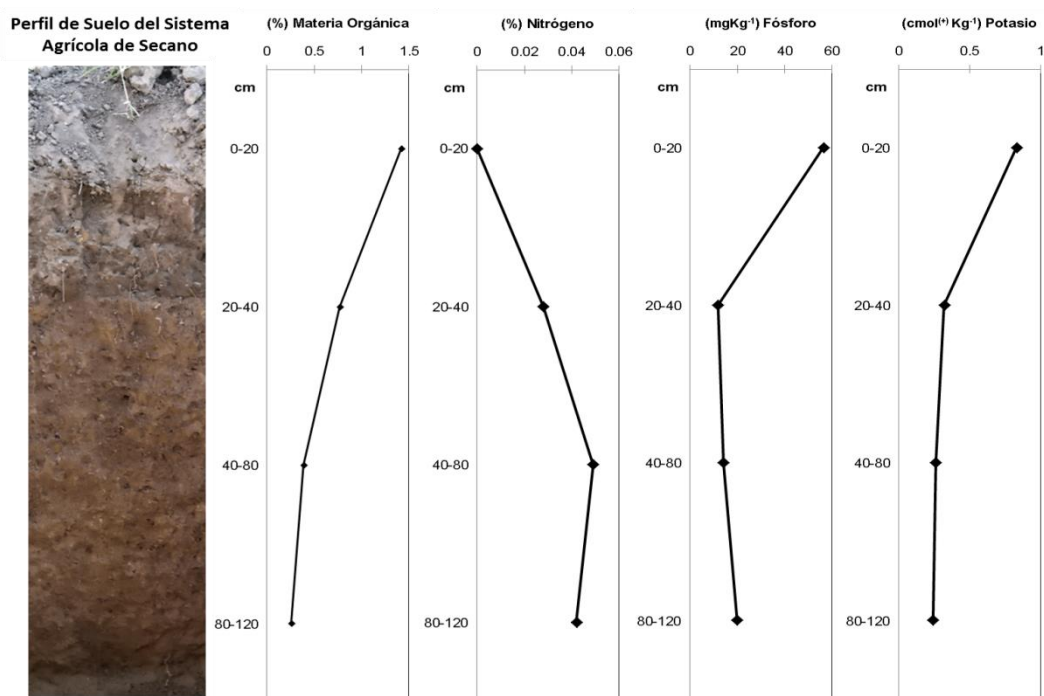


Figura 4. Propiedades edáficas en perfil de suelo agricultura tradicional de secano.

El horizonte Akp se observa bien definido debido a la labranza intensiva, dando lugar a una estructura de bloques subangulares moderadamente desarrollados. En condiciones húmedas el suelo es friable a partir del horizonte 2Bk1; sin embargo, en temporada de sequía es extremadamente duro, lo que limita el desarrollo radical y por ende la productividad.

La presencia de poros finos dentro de los agregados contribuye a la retención de agua, lo que permite un mayor aprovechamiento de la humedad en temporada de lluvias. La presencia de raíces es evidente hasta los 120 cm de profundidad, lo que indica una buena permeabilidad por la distribución de partículas, obteniendo una textura franca arcillo limosa en el horizonte superficial (0-20 cm) y el más profundo (80-120 cm); y franco limoso en los horizontes intermedios (20-40 y 40-80 cm), tal como se observa en el Cuadro 1. Estos cambios de textura indican discontinuidad litológica por acumulación de partículas depositada a través de los años por efecto de la topografía y la cercanía al río Pesquería. Asimismo, la CIC es alta hasta 1.20 m de profundidad, la cual puede incrementarse más con aportaciones de materia orgánica, lo que contribuiría a mejorar la fertilidad y las características físicas del suelo, siempre y cuando no se presenten temporadas prolongadas de sequía.

La Figura 4 muestra un bajo contenido de MO en los primeros dos horizontes del suelo y muy bajo en los dos horizontes adyacentes. El contenido de Nitrógeno (N) es nulo en el epipedón y posteriormente incrementa conforme aumenta la profundidad manteniéndose en baja concentración. El Fósforo (P) y Potasio (K) se encuentran en concentraciones altas en el horizonte superficial (Akp) y decrecen conforme aumenta la profundidad, manteniéndose en concentraciones altas de P y bajas para el K.

4.1.1.1. Clasificación de suelo del sistema tradicional de secano

El suelo del sistema de producción agrícola tradicional de secano reporta en el horizonte superficial un contenido ≥ 0.6 de % CO, un color en húmedo $10 YR \leq 3/3$ y un PSB $\geq 50\%$ a una profundidad de 0-20 cm. De acuerdo con la Base Referencial Mundial de Suelos (IUSS Working Group WRB, 2015), estos criterios cumplen para designar un horizonte de diagnóstico móllico, por lo tanto, se asigna al Grupo Kastanozem.

El Kastanozem contiene un horizonte cálcico, por lo que se asigna Calcic como calificador principal. Otras características que destacan son: estar arado a una profundidad de 20 cm y tiene más de 30 cm de espesor con textura francolimosa, por lo que se asignan los calificadores suplementarios *Aric* y *Siltic*, respectivamente. En consecuencia, la clasificación WRB (2015) para el suelo del sistema tradición de secano es un Calcic Kastanozems (*Aric*, *Siltic*).

Por otro lado, con base en la Clave para la Taxonomía de Suelos (Soil Taxonomy) (Soil Survey Staff, 2014), se tiene un régimen de humedad arídico, por lo tanto, se asigna al orden de *Aridisols*. Así mismo, se identifica un horizonte cálcico dentro de los 100 cm de la superficie del suelo del sistema de secano, asignando el Suborden de *Calcids* y posteriormente al Gran Grupo de *Haplocalcids* al no contar con una capa endurecida. No se presentan más características que otorguen información adicional, por lo tanto, la clasificación taxonómica del suelo del sistema de seca queda asignada como un *Typic Haplocalcids*.

4.1.2. Perfil de suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Riego

Localización: 25°52'22.1" N, 100°03'29.1" W.

Localidad: Facultad de Agronomía, Marín, N.L.

Elevación: 397 msnm.

Relieve: Plano con pendiente de 1%.

Drenaje superficial: Sitio bajo riego por goteo.

Uso de Tierra: Agrícola, gramíneas.

Labranza tradicional.

Material Parental: Sedimentario.



Figura 5. Sitio del Perfil de Suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Riego.

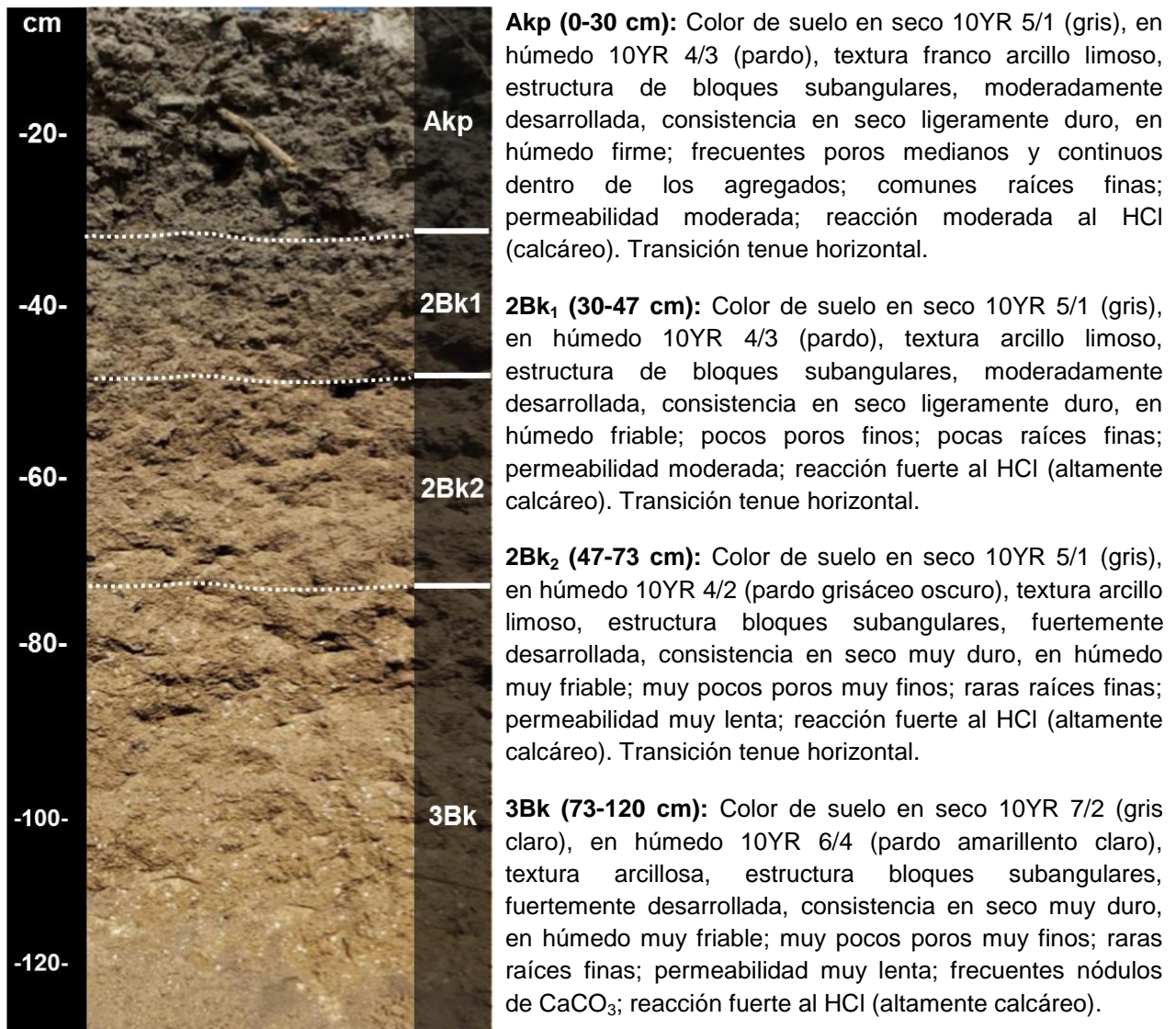


Figura 6. Perfil de Suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Riego.

Cuadro 2. Análisis físicos y químicos del perfil de suelo del Sistema de Agricultura Tradicional de Riego.

Símbolo del horizonte	Profundidad cm	Textura			Clase textural	Da g-cm ⁻³	Color en laboratorio		p H H ₂ O 2:1
		Arena	Limo %	Arcilla			Seco	Húmedo	
Akp	0-30	4.9	64.4	30.5	Franco Arcillo Limoso	1.33	10YR 5/1	10YR 4/3	8.1
2Bk1	30-47	5.2	49.9	44.9	Arcillo Limoso	1.12	10YR 5/1	10YR 4/3	8
2Bk2	47-73	5.1	48.0	47.0	Arcillo Limoso	1.47	10YR 5/1	10YR 4/2	7.9
3Bk	73-120	9.2	19.8	71.0	Arcilla	1.59	10YR 7/2	10YR 6/4	7.9

Símbolo del horizonte	CO	MO	CaCO ₃	N	CIC NH ₄ Oc, 1N ⁻⁷	K ⁺	P olsen	CE	PSB
	%	%	%	%	cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	mgKg ⁻¹	mgKg ⁻¹	dSm ⁻¹	%
Akp	0.60	1.03	36.3	0.239	38.92	0.54	50.5	1.18	>100
2Bk1	0.90	1.54	38.3	0.091	40.72	0.77	57.8	0.7	>100
2Bk2	0.60	1.03	41.3	0.084	39.12	0.32	19.9	0.74	>100
3Bk	0.45	0.77	46.0	0.014	34.50	0.26	20.9	0.81	>100

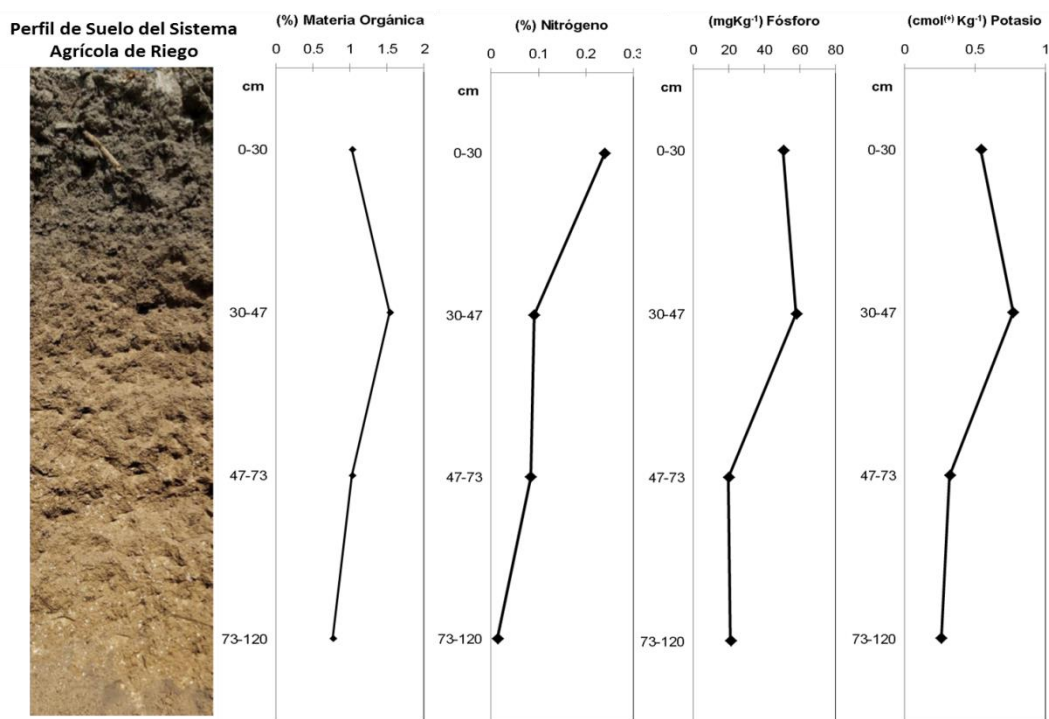


Figura 7. Propiedades edáficas en perfil de suelo agricultura tradicional de riego.

La presencia de porosidad de tamaño medio hasta fino se presenta conforme se incrementa la profundidad del perfil, lo que resulta benéfico para la infiltración, aireación y retención de humedad. Por ser un sitio bajo riego, la humedad constante ha contribuido al desarrollo y presencia de raíces finas y comunes hasta el 1.20 m de profundidad. En periodo de sequía el suelo se endurece, por lo que hay que evitar llegar a esta situación poniendo especial atención en la programación de riegos con el objeto de evitar ocasionar dificultades para el desarrollo radical de los cultivos.

El Cuadro 2 muestra el análisis de suelo para cada horizonte, este destaca que la clase textural es franco arcillo limoso en el horizonte superficial, arcillo limoso en los horizontes de 30-47 y 47-73 cm, y arcilla en el horizonte más profundo. Este arreglo de partículas contribuye a un buen crecimiento y distribución de las raíces, así como una buena retención de humedad. Presenta poco contenido de materia orgánica que decrece ligeramente respecto a la profundidad (1.03-0.77%). La CIC es considerada alta en todo el perfil de suelo debido a los contenidos de arcilla.

La Figura 7 señala un bajo contenido de materia orgánica (MO) en todo el perfil de suelo. El contenido de nitrógeno (N) es alto en el horizonte superficial y decrece conforme la profundidad. El contenido de fósforo (P) disminuye conforme aumenta la profundidad y se encuentra en cantidades muy altas en todo el perfil. La concentración de Potasio (K) va de media a alta, media y muy baja con respecto a la profundidad. El alto contenido de N en el horizonte superficial es debido a las aportaciones constantes de fertilizantes sintéticos. Las altas concentraciones P son debido a las propiedades no móviles del nutrimento y la poca solubilidad, así mismo,

como menciona Ortiz (2019), en suelos calcáreos alcalinos, los iones de PO_4^- parecen ser precipitados como fosfatos de Ca y Mg.

4.1.2.1. Clasificación de suelo del sistema tradicional de riego

El sistema de producción agrícola tradicional de riego presenta un suelo con un horizonte subsuperficial, con un contenido de carbonatos de calcio $\geq 15\%$ y gran acumulación de CaCO_3 secundario en forma de nódulos. La Base Referencial Mundial de Suelos (IUSS Working Group WRB, 2015), asigna estos criterios para un horizonte de diagnóstico cálcico, por lo tanto, corresponde al Grupo Calcisols.

El suelo presenta también un horizonte cámbico, por lo que se otorga como calificador principal Cambic. Otras características presentes son: actividad mecanizada (arado), a una profundidad de 30 cm, tiene más de 30 cm de espesor con textura arcillo limosa, un color húmedo 10YR 6/4 en los 73-120 cm y tiene 0.60% de CO, de tal forma, se asignan los calificadores suplementarios *Aric*, *Clayic*, *Chromic* y *Ochric*, respectivamente. La clasificación WRB (2015) para el suelo del sistema agrícola de riego es Cambic Calcisols (*Aric*, *Chromic*, *Clayic*, *Ochric*).

La Clave para la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2014) considera que un régimen de humedad del suelo arídico con sistema de riego cambia a ústico y al presentarse un horizonte cálcico sin más características representativas, la clasificación taxonómica se otorga al Orden de *Aridisols*, Suborden de *Calcids*, Gran Grupo de *Haplocalcids* y al Subgrupo de *Ustic Haplocalcids*.

4.1.3. Perfil de suelo del Sistema de Agricultura Tradicional Pastizal

Localización: 25°52'59.6" N, 100°03'06.7" W.

Localidad: Facultad de Agronomía, Marín, N.L.

Elevación: 392 msnm.

Relieve: Plano con pendiente de 2%.

Drenaje superficial: Sitio normal.

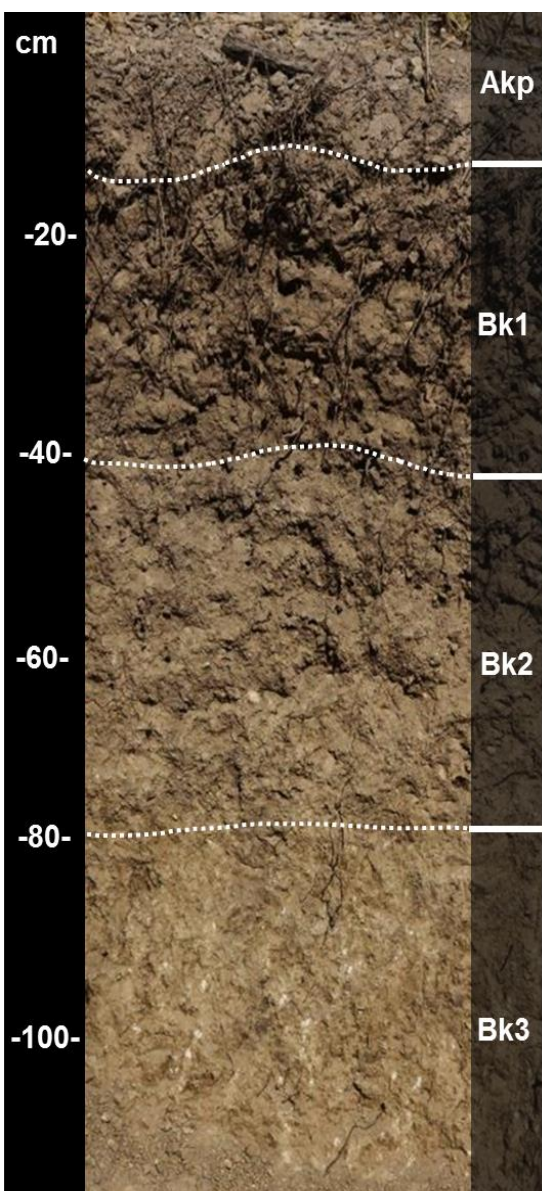
Uso de Tierra: Agrícola, pastizal.

Labranza mínima.

Material Parental: Sedimentario.



Figura 8. Sitio del Perfil de Suelo del Sistema Pastizal.



Akp (0-10/17 cm): Color de suelo en seco 10YR 5/2 (pardo grisáceo), en húmedo 10YR 3/3 (pardo oscuro), textura arcillo limoso, estructura de bloques subangulares, fuertemente desarrollada, consistencia en seco muy duro, en húmedo muy friable; pocos poros muy finos; abundantes raíces medias; permeabilidad lenta; reacción fuerte al HCl (altamente calcáreo). Transición marcada ligeramente ondulada.

Bk1 (10/17-38/42 cm): Color de suelo en seco 10YR 5/2 (pardo grisáceo), en húmedo 10YR 3/3 (pardo oscuro), textura arcillo limoso, estructura de bloques subangulares, fuertemente desarrollada, consistencia en seco muy duro, en húmedo friable; frecuentes poros medianos y presencia de macroporos; comunes raíces medias; permeabilidad lenta; reacción fuerte al HCl (altamente calcáreo). Transición marcada ligeramente ondulada.

Bk2 (38/42-80 cm): Color de suelo en seco 10YR 6/2 (gris pardusco claro), en húmedo 10YR 4/3 (pardo), textura arcillo limoso, estructura bloques subangulares, fuertemente desarrollada, consistencia en seco muy duro, en húmedo friable; pocos poros muy finos y presencia de macroporos; pocas raíces medias; permeabilidad lenta; reacción fuerte al HCl (altamente calcáreo). Transición tenue horizontal.

Bk3 (80-120 cm): Color de suelo en seco 10YR 7/1 (gris claro), en húmedo 10YR 6/4 (pardo amarillento claro), textura arcillo limoso, estructura bloques subangulares, fuertemente desarrollada, consistencia en seco muy duro, en húmedo friable; pocos microporos; muy raras raíces delgadas; permeabilidad lenta; frecuentes nódulos de CaCO_3 , pequeños, blancos, prismáticos y blandos; reacción fuerte al HCl (altamente calcáreo).

Figura 2. Perfil de Suelo del Sistema Pastizal.

Cuadro 3. Análisis físicos y químicos del perfil de suelo del Sistema de Pastizal.

Símbolo del horizonte	Profundidad cm	Textura				Clase textural	Da g·cm ⁻³	Color en laboratorio		p H H ₂ O 2:1
		Arena	Limo	Arcilla	Seco			Húmedo		
Akp	0-10/17	2.8	54.1	43.2	Arcillo Limoso	1.41	10YR 5/2	10YR 3/3	7.9	
Bk1	10/17-38/42	1.6	50.8	47.6	Arcillo Limoso	1.30	10YR 5/2	10YR 3/3	7.9	
Bk2	38/42-80	1.4	51.9	46.7	Arcillo Limoso	1.42	10YR 6/2	10YR 4/3	8	
Bk3	80-120	4.7	46.2	49.2	Arcillo Limoso	1.56	10YR 7/1	10YR 6/4	8	

Símbolo del horizonte	CO	MO	CaCO ₃	N	CIC NH ₄ Oc,1N ⁻⁷	K ⁺	P olsen	CE	PSB
Akp	0.90	1.54	32.7	0.126	36.51	1.20	74.5	0.27	>100
Bk1	1.34	2.32	32.7	0.176	52.56	0.54	61.1	0.29	>100
Bk2	0.82	1.42	34.7	0.105	39.92	0.51	14.4	0.37	>100
Bk3	0.60	1.03	41.3	0.049	31.29	0.50	15.0	1.14	>100

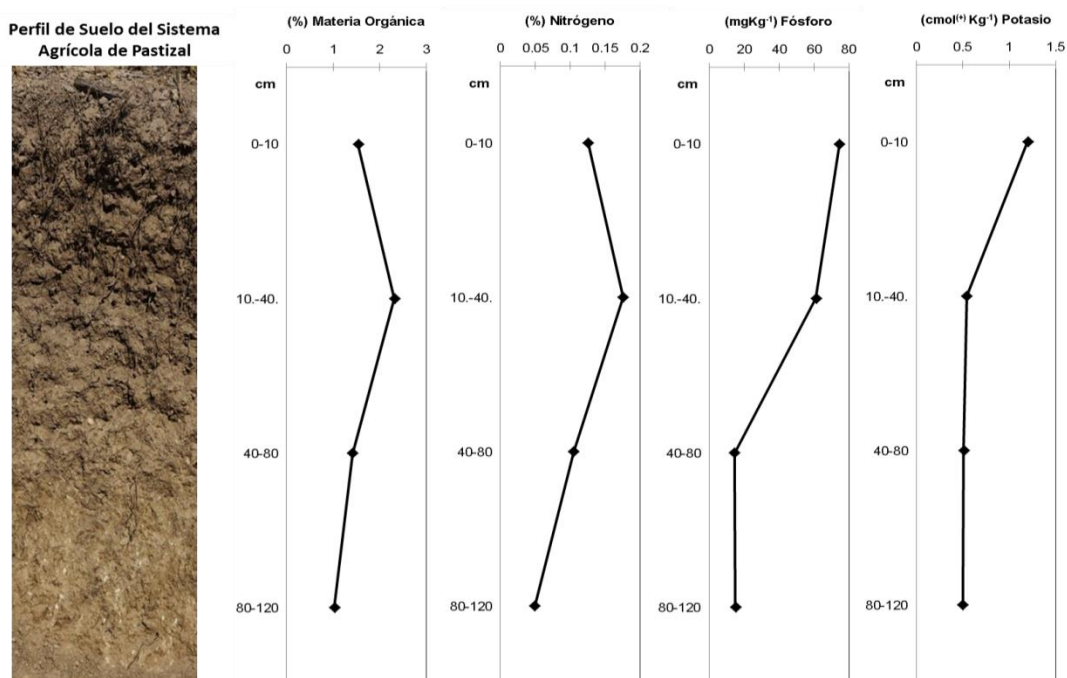


Figura 10. Propiedades edáficas en Perfil de Suelo Sistema de Pastizal.

La labranza mínima y el establecimiento de pastos ha contribuido a la formación de agregados fuertemente desarrollados a partir de los 40 cm de profundidad, dando lugar a una estructura edáfica bien definida, friable en condiciones de humedad y muy duro en seco. La presencia de macro y microporos es evidente hasta los 120 cm de profundidad, lo que favorece la retención de agua higroscópica para el aprovechamiento de la humedad, la aireación y el desarrollo radical. En el horizonte superficial se observan abundantes raíces gruesas medias y conforme aumenta la profundidad, disminuye la cantidad, pero se mantiene el tamaño de estas. El horizonte de 80-120 cm de profundidad presenta frecuentes nódulos de carbonatos secundarios.

El Cuadro 3 reporta altos contenidos de limo y arcilla en todo el perfil, así como CIC (de 31.29 a 52.56 $\text{cmol}^{(+)} \text{Kg}^{-1}$) hasta 120 cm de profundidad; se presentan altas concentraciones de CaCO_3 , (hasta 41.3%), un alto contenido de carbono orgánico (>0.60%), en todo el perfil de suelo y efectos despreciables a la salinidad (<1%). La Figura 10 contempla los contenidos de MO, N, P, K en la profundidad del perfil de suelo. La MO se encuentra en concentración media, aumenta ligeramente en el segundo horizonte y posteriormente decrece conforme aumenta la profundidad. El N se encuentra en concentración media en el horizonte superficial, alta en el segundo horizonte y continúa disminuyendo hasta muy bajo en el horizonte más profundo. El P disminuye con respecto a la profundidad, sin embargo, se considera en contenidos altos en todo el perfil. La concentración de K es alta en el epipedón y se mantiene homogénea en cantidades medias en los demás horizontes.

4.1.3.1. Clasificación de suelo del sistema pastizal

El sistema de producción de pastizal reporta un horizonte subsuperficial con gran acumulación de CaCO_3 secundario en forma de nódulos blandos y un contenido de carbonatos de calcio $\geq 15\%$. De acuerdo con la Base Referencial Mundial de Suelos (IUSS Working Group WRB, 2015), el horizonte reúne los criterios para designarlo como horizonte de diagnóstico cálcico, por lo que se asigna al Grupo Calcisols.

El suelo presenta características típicas de un Calcisol, al no haber características adicionales que sean significativas, por lo que se establece como calificador principal Haplic. Otras características presentes son: más de 30 cm de espesor con textura arcillo limoso, un color húmedo 10YR 6/4 en los 80-120 cm de profundidad y contiene 0.90% de CO en los primeros 10 cm, de tal forma, se otorgan los calificadores suplementarios *Clayic*, *Chromic* y *Ochric*, respectivamente. Por lo tanto, la clasificación WRB (2015) para el suelo del sistema pastizal es: Haplic Calcisols (*Clayic*, *Chromic*, *Ochric*).

La Clave para la Taxonomía de Suelos (Soil Taxonomy) (Soil Survey Staff, 2014), clasifica al suelo del sistema pastizal en el Orden de *Aridisols*, Suborden de *Calcids*, Gran Grupo de *Haplocalcids* y al Subgrupo de *Typic Haplocalcids*. Debido al régimen de humedad arídico, presentar un horizonte cálcico dentro de los 100 cm de la superficie del suelo, no contar con una capa endurecida y no presentar más características significativas.

4.1.4. Diferencias Edáficas en los Sistemas Productivos

Los suelos de los tres sitios (Figura 11) son medianamente alcalinos (pH de 7.6 a 8), con altos contenidos de Carbonatos de Calcio (CaCO_3) (20.7-46%) y bajo contenido de materia orgánica (MO de 0.26 a 2.32%) (Cuadro 4) tal como comentan Williams *et al.* (2017) para suelos en el Noreste de México.

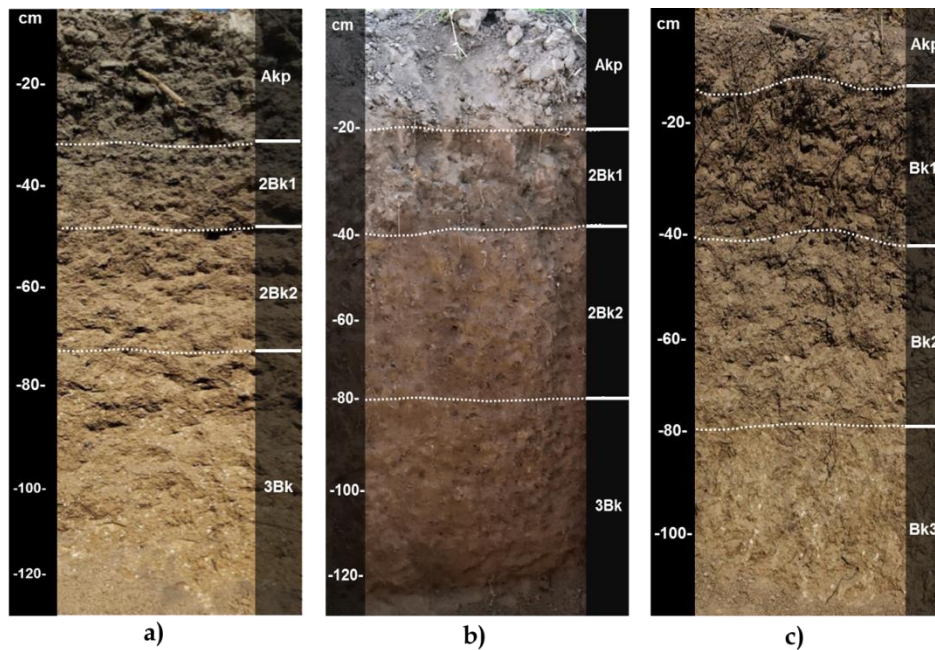


Figura 3. Perfiles de suelo en el sistema productivo. a) Riego, b) Secano, c) Pastizal

Los suelos del sistema productivo tanto de riego (Figura 11a) como de secano (Figura 11b) presentan discontinuidades litológicas por reportar diferentes concentraciones de arcilla en los horizontes subsuperficiales, debido a material depositado por arrastre. En el sistema de pastizal (Figura 11c), a partir del horizonte subsuperficial, la compactación del suelo en seco es excesiva al igual que en el sistema de secano y de riego, tal como lo reportan Sun *et al.* (2021), en regiones áridas y semiáridas. Los suelos arcillosos con alto contenido de calcio provocan

acumulación de CaCO_3 tal como se presenta en todos los perfiles, esta floculación excesiva conduce a suelos compactados. No obstante, de acuerdo con Sosa *et al.* (2022), otro factor que favorece la compactación del suelo es el pastoreo de ganado bovino y el tránsito de maquinaria agrícola para el caso de cada sistema productivo.

El desarrollo estructural de los suelos es el resultado de la mínima labranza en el sistema pastizal, contrario al epipedon en el sistema de producción bajo riego y seco, producto de la labranza mecanizada intensiva (Agricultura tradicional) que pulveriza constantemente el horizonte Apk. No obstante, los demás horizontes cuentan con estructura bien desarrollada y bloques subangulares definidos, de acuerdo con Rabot *et al.* (2018) es un indicador importante de las funciones del suelo, al favorecer la fertilidad y beneficiar el crecimiento radical de las plantas.

Cuadro 4. Análisis de perfiles de suelo de sistemas de riego, seco y pastizal.

Sitio	H. Genético	Profund.	MO	CaCO_3	N	P olsen	K+	pH	Clase Textural
		cm		%		mgKg^{-1}	$\text{cmol}^{(+)}\text{Kg}^{-1}$	H_2O 2:1	
Riego	Akp	0-30	1.03	36.3	0.239	50.5	0.54	8.1	Franco Arcillo Limoso
	2Bk1	30-47	1.54	38.3	0.091	57.8	0.77	8	Arcillo Limoso
	2Bk2	47-73	1.03	41.3	0.084	19.9	0.32	7.9	Arcillo Limoso
	3Bk	73-120	0.77	46.0	0.014	20.9	0.26	7.9	Arcilla
Secano	Akp	0-20	1.42	35.5	0.000	56.4	0.83	7.6	Franco Arcillo Limoso
	2Bk1	20-40	0.77	20.7	0.028	11.8	0.32	8	Franco Limoso
	2Bk2	40-80	0.39	27.3	0.049	14.2	0.26	8.1	Franco Limoso
	3Bk	80-120	0.26	26.7	0.042	19.9	0.24	8.1	Franco Arcillo Limoso
Pastizal	Akp	0-10/17	1.54	32.7	0.126	74.5	1.20	7.9	Arcillo Limoso
	Bk1	10/17-38/42	2.32	32.7	0.176	61.1	0.54	7.9	Arcillo Limoso
	Bk2	38/42-80	1.42	34.7	0.105	14.4	0.51	8	Arcillo Limoso
	Bk3	80-120	1.03	41.3	0.049	15.0	0.50	8	Arcillo Limoso

De acuerdo con la Agenda Técnica Agrícola de N.L. (SAGARPA, 2015), la recomendación de fertilización para las gramíneas en condiciones de riego es de 200 kg ha⁻¹ de urea y 150 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico. La constante aplicación de fertilizantes da como resultado reservas minerales en el suelo, coincidiendo con un manejo agronómico adecuado de fertilización en el sistema agrícola de riego. Por otro lado, las concentraciones altas de P y K (Cuadro 4) en el sistema de secano y pastizal son debido a la escasa absorción y poca lixiviación por ausencia de precipitaciones constantes frecuentes en el área de estudio. Nehrani *et al.* (2020) comentan que la capacidad productiva del suelo es esencial para prevenir la degradación debido a que está cubierto con vegetación por cultivos básicos o pastizales y así contribuir a la seguridad del suministro de alimentos.

4.2. Morfología y Fertilidad Diacrónica

Los cambios morfológicos del suelo en los sistemas de producción de secano, riego y pastizal al cabo de tres décadas (Figura 12) no han sido significativos en cuanto a características de textura, estructura, color, pH, permeabilidad y contenido de CaCO₃. No obstante, propiedades como la consistencia, en los tres sistemas de producción, pasó de ser blando a ser ligeramente duro y muy duro en el horizonte superficial; y de ligeramente duro a muy duro en horizontes subsuperficiales. Así mismo la porosidad también presentó cambios al incrementar la microporosidad y disminuir los macroporos en los sistemas de secano y riego. Por otro lado, el sistema pastizal conserva la macroporosidad y presenta un aumento de cantidad en los microporos dentro de los agregados.

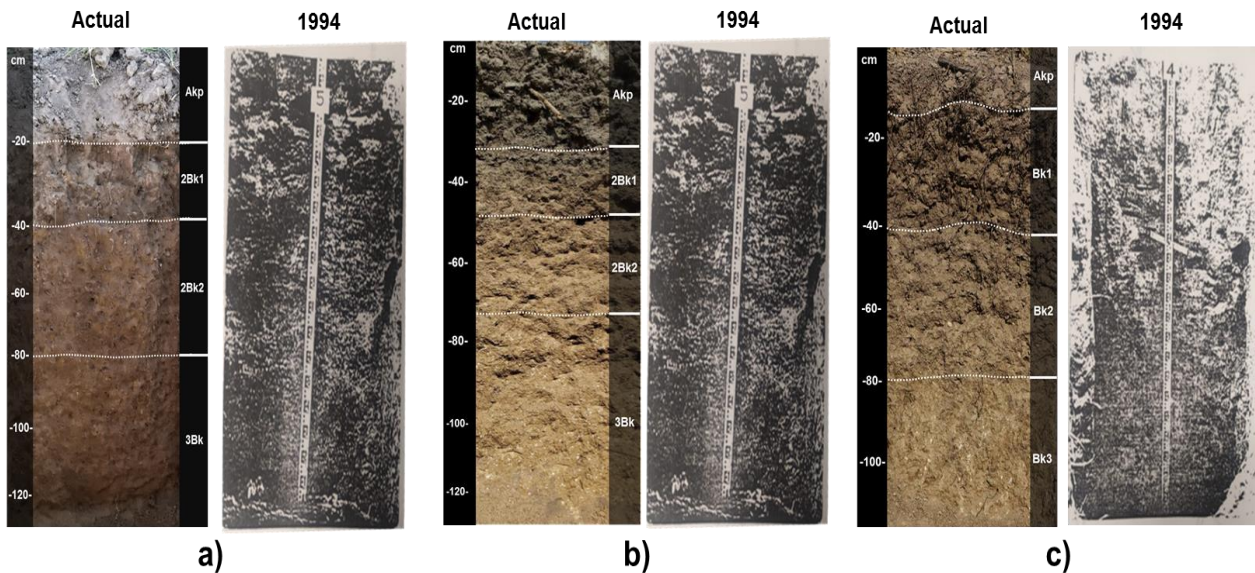


Figura 12. Perfiles de suelo actual e histórico (Pissani et al., 1994). a) Secano, b) Riego y c) Pastizal.

La fertilidad, por el contrario, mostró diferencias abruptas al pasó de treinta años, principalmente en los contenidos de materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). El suelo del sistema de producción en condiciones de secano presentó un incremento del doble en el contenido de MO en el horizonte superficial, pero tuvo un decremento de la misma magnitud en el horizonte 2Bk1, tal como se muestra en la Figura 13a. Las reservas de N se encuentran agotadas actualmente en el epipedón y disminuyeron 66% en el horizonte con profundidad de 20-40 cm; no obstante, se incrementó un 400% en la profundidad de 40-80 cm (Figura 13b), probablemente por efecto de lixiviación en eventos anormales de lluvias abundantes. Las concentraciones de P y K aumentaron un 1,000% y un 400% respectivamente en el horizonte superficial, y de 100% a 200% en los horizontes subsuperficiales, tal como se observa en la Figura 13c y d.

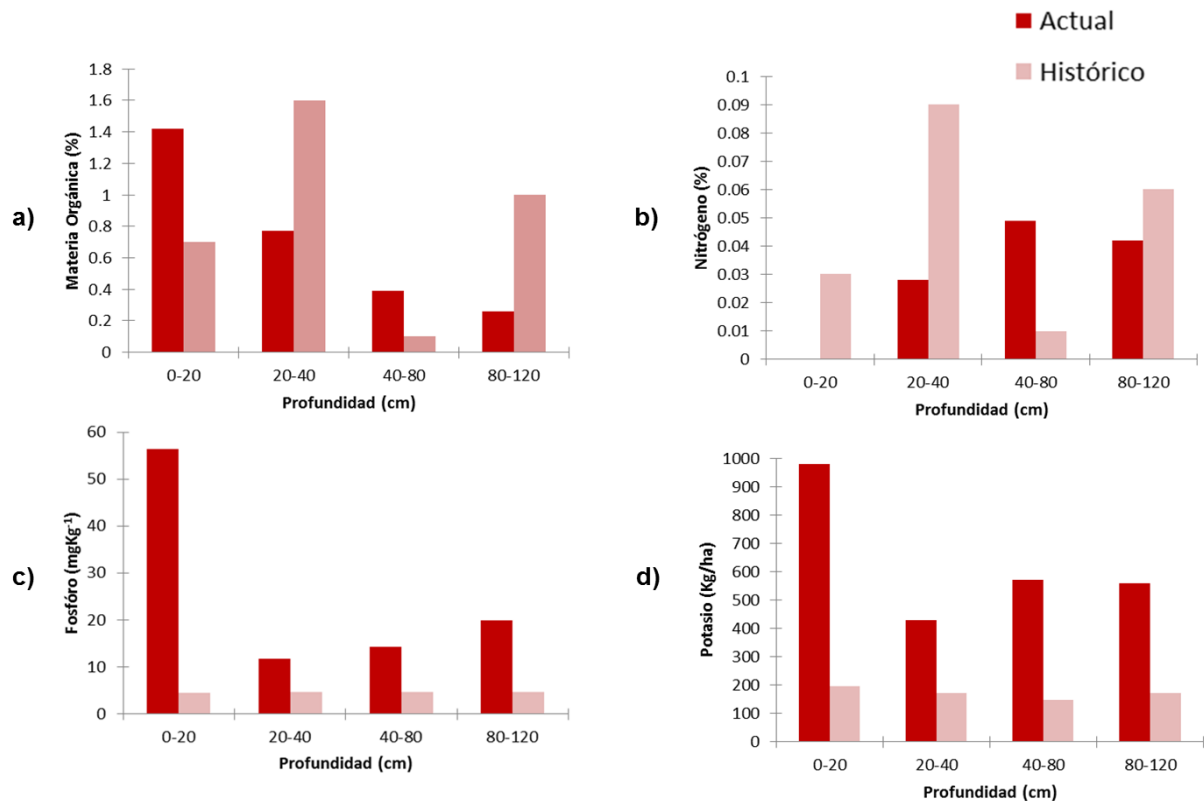


Figura 13. Datos históricos y actuales de materia orgánica (a), nitrógeno (b), fósforo (c) y potasio (d) del perfil de suelo del sistema de agricultura tradicional de secano.

El porcentaje de materia orgánica disminuyó 2.5% en el epipedón y 0.5% en el endopedón del sistema de producción irrigado (Figura 14a). El contenido de nitrógeno incrementó un 0.09 unidades en el horizonte superficial y tan solo 0.01 unidades en el horizonte subyacente (Figura 14b). Los mgKg^{-1} de fósforo incrementaron 9, 10 y 3 veces en los horizontes de 0-30 cm, 30-47 cm y 47-120 cm respectivamente (Figura 14c). El dato histórico de las concentraciones de potasio en el sitio era en promedio de 200 kg ha^{-1} en cada horizonte. Actualmente, se presenta concentraciones de hasta 850 kg ha^{-1} en el horizonte superficial, el resto de las concentraciones se aprecian en la Figura 14d.

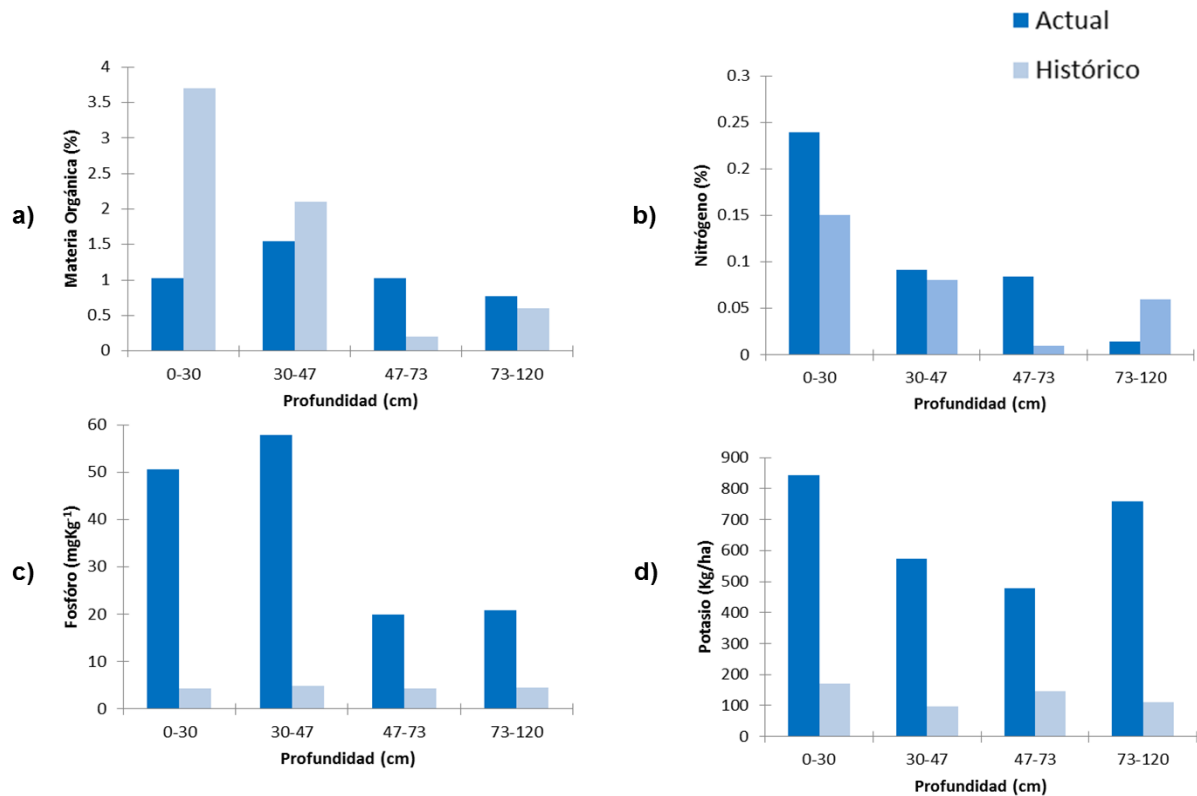


Figura 14. Datos históricos y actuales de materia orgánica (a), nitrógeno (b), fósforo (c) y potasio (d) del perfil de suelo del sistema de agricultura tradicional de riego.

El sistema de producción de pastizal, a diferencia del de secano y de riego, mostró ligeros incrementos en el contenido de materia orgánica (Figura 15a) y aumentos de al menos 2 y hasta 12 veces en las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio, tal como se reporta en la Figura 15b, c y d.

Norris *et al.* (2015) mencionan que los suelos calcáreos son sensibles a las perturbaciones, por lo que factores como el decremento de MO y altos contenidos de arcilla promueven la compactación del suelo. Asimismo, López *et al.* (2018) atribuyen el encostramiento y el piso de arado al laboreo intensivo de los suelos y bajos contenidos de MO, tal como sucede en los sistemas de producción de secano y

riego, al presentar compactación en sus horizontes al mantener el sistema de labranza tradicional y la nula aportación de enmiendas orgánicas durante tres décadas.

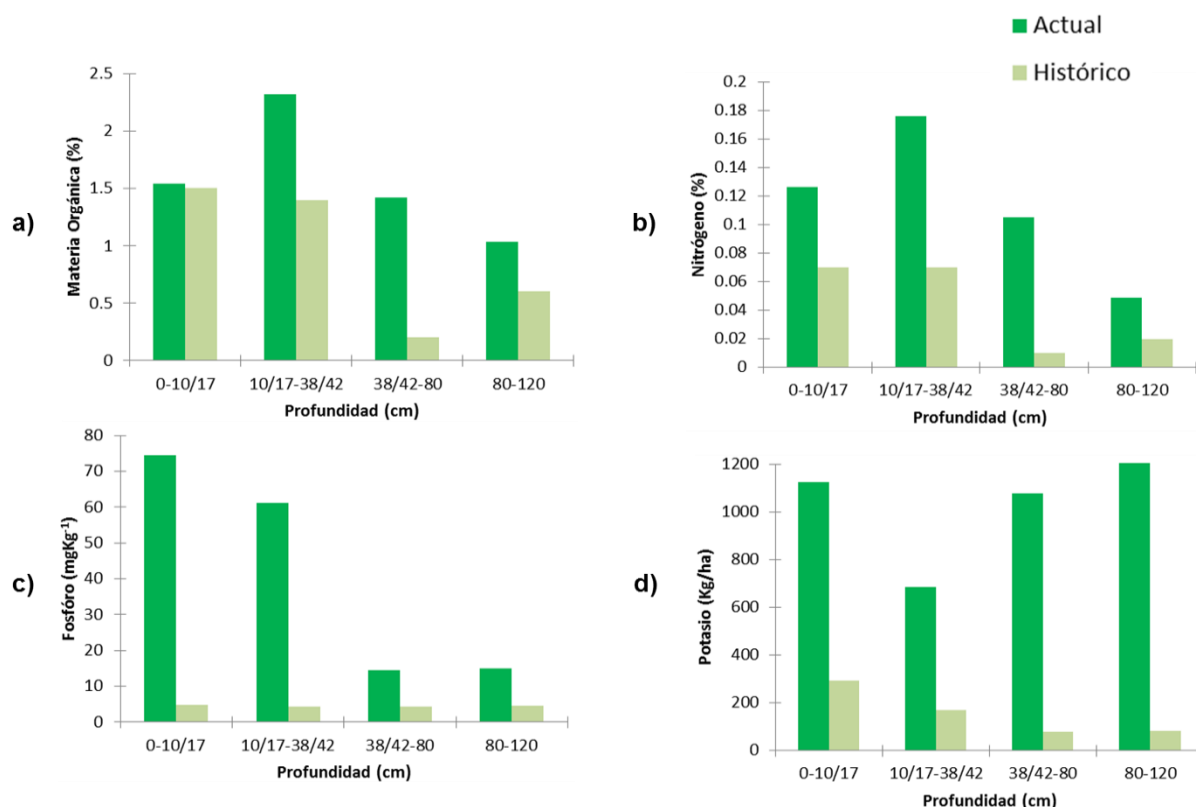


Figura 4. Datos históricos y actuales de materia orgánica (a), nitrógeno (b), fósforo (c) y potasio (d) del perfil de suelo del sistema pastizal.

Eeswaran *et al.* (2021) afirman que la labranza cero es el tratamiento más resistente y eficiente para promover la retención de humedad del suelo, mitigar la sequía y mantener e incluso aumentar el rendimiento de los cultivos. Con base a los resultados obtenidos se recomienda implementar este sistema de labranza en el sitio de producción en condiciones de seco, junto con aportaciones de material orgánico para mejorar la calidad del suelo.

Por el contrario, para el sitio de riego, es conveniente implementar un sistema de labranza estratégico u ocasional con cincel, Al respecto, Liu *et al.* (2016), indican que este tipo de labranza es más efectiva que la labranza cero ya que genera efectos positivos en la biología del suelo al aumentar el carbono de la biomasa microbiana del suelo y al estar en condiciones irrigadas, en conjunto con enmiendas orgánicas, contribuiría a mejorar la salud del suelo.

El sistema de producción de pastizal fue el que mayor conservación presentó al cabo de treinta años, al mostrar incrementos en todas las reservas minerales y contenido de MO, coincidiendo con lo concluido por Liu *et al.* (2020), al reportar que los pastizales son uno de los principales tipos de vegetación para la restauración en regiones áridas y semiáridas. Asimismo, Huang *et al.* (2017) comentan que, en comparación con los bosques, los pastizales mantienen mejor la humedad del suelo y logran la restauración sostenible de la vegetación. Se ha demostrado que el denso sistema radical contribuye a la supervivencia de las plantas en condiciones climáticas extremas y mejora las propiedades del suelo superficial, tal como se presentó en el sitio de estudio y como lo reportan Shi *et al.* (2012) y Wu *et al.* (2014).

Guo *et al.* (2019) comentan que la formación de macroporos continuos después de la muerte y descomposición de las raíces es de gran importancia para acelerar la migración del agua del suelo y mejorar la permeabilidad del suelo en los pastizales. Los resultados obtenidos en la presente investigación muestran que el sistema de pastizal es el que mayor beneficio otorga a la conservación del recurso edáfico.

La clasificación de suelos actual en comparación con la de hace 30 años (Figura 5) presentó un cambio significativo en el sitio de secano y de riego. En el primer sitio, se desarrolló el horizonte móllico, por lo que considerando los criterios establecidos por la WRB, se reasignó, pasando del grupo de Calcisols al de Kastanozems. En el segundo sitio, el horizonte móllico presente hace tres décadas, cambio una unidad en el value del color, cambiando la clasificación, asignando al grupo de Calcisols lo que antes se clasificaba como Kastanosems en la WRB y moviéndose de un *Ustic Haplocambids* a *Ustic Haplocalcids* en el caso de la Taxonomía de Suelos.

El suelo del sitio de pastizal se mantuvo en la misma clasificación y al igual que el sitio de riego, el horizonte superficial cumple con todos los criterios para horizonte designar un horizonte móllico, excepto el de espesor y el de color, lo que indica que en un futuro la clasificación del suelo podría cambiar.

Cuadro 5. Clasificación histórica y actual de suelos de los sitios de secano, riego y pastizal (WRB y Taxonomía de Suelos).

Sitio	Clasificación WRB		Clasificación Taxonomía de Suelos	
	1984	Actual	1984	Actual
Secano	Haplic Calcisols (<i>Aric, Clayic, Ochric</i>).	Calcic Kastanozems (<i>Aric, Siltic</i>)	<i>Typic Haplocalcids</i> .	<i>Typic Haplocalcids</i> .
Riego	Calcic Kastanozems (<i>Aric, Clayic, Ochric</i>).	Cambic Calcisols (<i>Aric, Chromic, Clayic, Ochric</i>).	<i>Ustic Haplocambids</i>	<i>Ustic Haplocalcids</i> .
Pastizal	Haplic Calcisols (<i>Aric, Clayic, Ochric</i>).	Haplic Calcisols (<i>Clayic, Chromic, Ochric</i>).	<i>Typic Haplocalcids</i> .	<i>Typic Haplocalcids</i> .

5. CONCLUSIONES

La concentración de nitrógeno en los tres sistemas productivos es baja, debido a la demanda de las gramíneas aun cuando se aplican fertilizantes sintéticos. A pesar de ser suelos calcáreos se reportan altas concentraciones de fósforo y potasio por el déficit hídrico durante todo el año, evitando lixiviación e intercambio iónico.

La agregación entre partículas del sistema pastizal es de bloques subangulares fuertemente desarrollados en el horizonte Akp en contraste a los sistemas de riego y seco por la disgregación de partículas ocasionada por labranza tradicional.

El sistema de producción de pastizal fue el que mostró mayor conservación del recurso suelo al presentar una buena reserva de nutrimentos (N, P y K) y mayor contenido de MO. Por lo que el establecimiento de pastizales en el noreste de México es una alternativa a la preservación de los suelos y a la producción de pastos que contribuya a la alimentación del ganado y por consecuencia, al aumento de la producción de proteína animal para la alimentación del ser humano.

El manejo agronómico durante los últimos años tuvo un efecto positivo en los suelos agrícolas al no mostrar una degradación física ni química significativa, sin embargo, el implementar prácticas como la rotación de cultivos, labranza mínima o de conservación y el aporte de materia orgánica, lograría mejorar la productividad y sostenibilidad del recurso edáfico.

El sitio de riego presentó un cambio en la clasificación del suelo al presentar una pequeña degradación al perder el horizonte móllico por el decremento de la MO. En el suelo del sitio de seco, sucedió lo contrario, formándose dicho horizonte y

cambiando la clasificación, pasando del grupo de Calcisols al de Kastanozems. El sitio de pastizal se mantuvo con la misma clasificación, sin embargo, al igual que el sitio de riego, la clasificación podría cambiar en un futuro al terminar de desarrollarse el horizonte móllico. La clasificación de suelos con base en la WRB y las Claves para la Taxonomía de suelos, permite identificar fácilmente características edáficas importantes y proponer un manejo adecuado para cada grupo de suelo, así como identificar algún efecto de degradación o conservación.

6. LITERATURA CITADA

- Aeschbach, W., & Gleeson, T. (2012). Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion. *Nature Geoscience*, 5(12), 853-861.
- Akinde, B., Olakayode, A., Oyedele, D., & Tijani, F. (2020). Selected physical and chemical properties of soil under different agricultural land-use types in Ile-Ife, Nigeria. *Heliyon*, 6(9), e05090.
- Altamirano, A., Valdez, J., Valdez, C., León, J., Betancourt, M., & Osuna, T. (2017). Clasificación y evaluación de los distritos de riego en México con base en indicadores de desempeño. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(4), 79-99.
- Amézquita, E. (2013). Sistemas agropastoriles: Un enfoque integrado para el manejo sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia: Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. CIAT, Colombia. p. 29-57.
- Bagherzadeh, A. & Gholizadeh, A. (2018). Assessment of soil fertility for sugar beet production using fuzzy AHP approach and GIS in the Northeastern region of Iran Agric. Res. *Kurashiki*, 7 (1), pp. 61-71.
- Baveye, P., Otten, W., Kravchenko, A., Balseiro, M., Beckers, É., Chalhoub, M., Darnault, C., Eickhorst, T., Garnier, P., Hapca, S., Kiranyaz, S., Monga, O., Mueller, C., Nunan, N., Bote, V., Schüter, S., Schmidt, H., & Vogel, H. (2018). Emergent Properties of Microbial Activity in Heterogeneous Soil

- Microenvironments: Different Research Approaches Are Slowly Converging, Yet Major Challenges Remain. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1929, 1-48.
- Brevik, E. Cerdà, A., Mataix, J., Pereg, L., Quinton, J., Six, J. & Van Oost, K. (2015). The interdisciplinary nature of SOIL. *Soil*, 1(1), 117-129.
- Bullock, P., Stoops, G., Jongerius, A., Federoff, N., Tursina, T., & Babel, U. (1999). Manual para la descripción de secciones delgadas de suelos. Primera Edición. Trad. Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados. 213 p.
- Bwambale, E., Abagale, F. & Anornu, G. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324.
- Calderón, C., Bautista, G. & Rojas, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22(2), 141-157.
- Cerutti, M. (2015). La agriculturización del desierto: Estado, riego y agricultura en el norte de México (1925-1970). *Apuntes*, 42(77), 91-127.
- Cerutti, M. (2019). Trigo y revolución verde en el noroeste de México (1930-1970). *Mundo agrario*, 20(43).
- Chaves, D., Francelino, M., Jeune, W., Thomazini, A., Pereira, M., & Cunha, L. (2021). Soil mapping and characterization of the Mapou basin, Haiti. *Geoderma Regional*, 27, e00432.

- Cheik, S., Bottinelli, N., Minh, T., Doan, T., & Jouquet, P. (2019). Quantification of three dimensional characteristics of macrofauna macropores and their effects on soil hydraulic conductivity in northern Vietnam. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 31.
- Colombi, T., & Keller, T. (2019). Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. *Soil and Tillage Research*, 191, 156-161.
- Cuanalo, H. (1990). Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 40 p.
- Dinssa, B., & Elias, E. (2021). Characterization and classification of soils of Bako Tibe District, West Shewa, Ethiopia. *Heliyon*, 7(11), e08279.
- Eeswaran, R., Nejadhashemi, P., Alves, F. & Saravi, B. (2021). Evaluating the applicability of soil moisture-based metrics for gauging the resiliency of rainfed agricultural systems in the midwestern United States. *Soil and Tillage Research*, 205, 104818.
- Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., Glotter, M., Florke, M., Wada, Y., Mejer, N., Eisner, S., Fekete, B., Folbert, C., Foster, I., Goslin, S., Hadeland, I., Jabarov, N., Ludwig, F., Masaki, Y., Olin, S., Rosenzweig, C., Ruane, A., Sato, Y., Schmid, R., Stacke, T., Tangy, Q. & Wisser, D. (2014). Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3239-3244.

- Esquivel, R. (2006). Historia del deporte en la literatura: una propuesta para el sistema cubano de cultura física y deporte. Tesis doctoral, Universidad de Huelva, Departamento Didáctico de las Ciencias y Filosofía. 457 p.
- Falda, G., Fernandez, J. & Corbella, R. (2017). Guía de Estudio Morfología del Suelo. Cátedra de Edafología. Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán. Argentina. 16 p.
- FAO. (2016). Propiedades físicas del suelo. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/levantamientode-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>. Mayo, 2022.
- FAO. (2019). Propiedades Químicas. Portal de Suelos de la FAO. Recuperado de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>. Mayo, 2022.
- FAO. (2022). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. *Main report*. Rome. 393 p.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Quinta Edición. México. 97 p.
- Gaur, M. & Squires, V. (2018). Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands. Springer International Publishing, Switzerland, 348 p.
- Gaytán, D., Gutiérrez, E., Encinia, V., Vázquez, R., Olivares, E. & Gutiérrez, M. (2021). Sustainability of the Soil Resource in Intensive Production with Organic

- Contributions. *Agronomy*, 12(1), 67. Grafton, R., Williams, J., Perry, C., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall, B., Wheeler, S., Wang, Y., Garrick, D. & Allen, R. (2018). The paradox of irrigation efficiency. *Science*, 361(6404), 748-750.
- Grafton, R., Williams, J., Perry, C., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall, B., Wheeler, A., Wang, Y., Garrick, D. & Allen, R. G. (2018). The paradox of irrigation efficiency. *Science*, 361(6404), 748-750.
- González, E. & Torres, C. (2014). La sustentabilidad agrícola de las chinampas en el valle de México: caso Xochimilco. *Revista Mexicana de agronegocios*, 34, 699-709.
- Guo, L., Liu, Y., Wu, G., Huang, Z., Cheng, Z., Zhang, R., Tian, F. & He, H. (2019). Preferential water flow: influence of alfalfa (*Medicago sativa* L.) decayed root channels on soil water infiltration. *Journal Hydrol.* 578, 124019.
- Gutiérrez, E., Gutiérrez, M., Vargas, T., Cajuste, L., Delgadillo, J., Suástegui, E., & Ortiz, C. (2016). Micromapping of microbial hotspots and biofilms from different crops using digital image mosaics of soil thin sections. *Geoderma*, 279, 11-21.
- Huang, Z., Tian, F., Wu, G., Liu, Y. & Dang, Z., (2017). Legume grasslands promote precipitation infiltration better than gramineous grasslands in arid regions. *Land Degrad.* 28, 309-316.
- INIFAP. (2015). Establecimiento de pastos nativos e introducidos en zonas semiáridas de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,

Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca Y Alimentación. México: Primera Edición. 36 p.

IUSS Working Group WRB, (2015). Base de referencia mundial para recursos de suelo 2014, actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para nombrar suelos y crear leyendas para mapas de suelos. World Soil Resources Reports No. 106, FAO, Roma. 205 p.

Jakab, G., Vancsik, A., Filep, T., Madarász, B., Zacháry, D., Ringer, M., Ujházy, N & Szalai, Z. (2022). Soil organic matter characterisation using alkali and water extraction, and its relation to soil properties. *Geoderma Regional*, 28, e00469.

Jenny, H. (1941). Factors of soil formation. *Soil Science*, 52 (5) 415.

Jordan, C., Donoso, G., & Speelman, S. (2021). Measuring the effect of improved irrigation technologies on irrigated agriculture. A study case in Central Chile. *Agricultural Water Management*, 257, 107160.

Kimambo, N., L'Roe, J., Naughton, L., & Radeloff, V. (2020). The role of smallholder woodlots in global restoration pledges—Lessons from Tanzania. *Forest Policy and Economics*, 115, 102144.

Kooch, Y., Moghimian, N., & Kolb, S. (2019). Microbial hotspot areas of C and N cycles in old-growth Hyrcanian forests top soils. *Forest Ecology and Management*, 446, 93-104.

- Köppen, W. (1948). Climatología (versión directa de Grundriss der Klimatologie 1923, 1931 por Hendrichs Pérez). Fondo de Cultura Económica. México-Buenos Aires. 694 p.
- Kumar, U., Nayak, A., Shahid, M., Gupta, V., Panneerselvam, P., Mohanry, S., Kaviraj, M., Kumar, A., Chatterjee, D., Lal, B., Gautam, p., Tripathi, R., Panda, B. (2018). Continuous application of inorganic and organic fertilizer over 47 years in paddy soil alters the bacterial community structure and its influence on rice production. *Agriculture Ecosystem. Environment*, 262, pp. 65-75.
- Lavelle, P., Spain, A., Fonte, S., Bedano, J., Blanchart, E., Galindo, V., Grimaldi, M., Jimenez, J., Velasquez, E. & Zangerlé, A. (2020). Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. *Acta Oecologica*, 105, 103561.
- Lawrence, P., Maxwell, B., Rew, L., Ellis, C. & Bekkerman, A. (2018). Vulnerability of dryland agricultural regimes to economic and climatic change. *Ecol. Soc.*, 23 (1).
- Liu, H., Carvalhais, L., Rincon, V., Crawford, M., Dang, Y., Dennis, P. & Schenk, P. (2016). One-time strategic tillage does not cause major impacts on soil microbial properties in a no-till Calcisol. *Soil and Tillage Research*, 158, 91-99.
- Liu, Y., Guo, L., Huang, Z., López, M., & Wu, G. (2020). Root morphological characteristics and soil water infiltration capacity in semi-arid artificial grassland soils. *Agricultural Water Management*, 235, 106153.

- Loaiza, W., Carvajal, Y. & Ávila Á. (2014). Evaluación agroecológica de los sistemas productivos agrícolas en la microcuenca Centella (Dagua, Colombia). *Colombia Forestal*, 17(2), 161-179.
- Loaiza, W., Reyes, A. y Carvajal, Y. (2012). Aplicación del índice de Sostenibilidad del Recurso Hídrico en la Agricultura (ISRHA) para definir estrategias tecnológicas sostenibles en la microcuenca Centella. *Ingeniería y Desarrollo*, 3 (2), 160-181.
- López, C. (1996). Uso eficiente del agua en un agrosistema sustentable. Memoria del II Simposio Internacional y III Reunión Nacional en Agricultura Sostenible. San Luis Potosí, México. pp. 329-338.
- López, C. (2006). Rendimiento de maíz y frijol en la agricultura de secano en México. Instituto de Recursos Genéticos y Productividad. México. 10 p.
- López, W., Reynoso, R., López, J., Camas, R. & Tasistro, A. (2018). Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1), 65-79.
- Menon, M., Mawodza, T., Rabbani, A., Blaud, A., Lair, G., Babaei, M., Kercheva, M., Rouseva, S., & Banwart, S. (2020). Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability. *Geoderma*, 366, 114259.
- Milleret, R., Le Bayon, R. Lamy, F., Gobat, J., & Boivin, P. (2009). Impact of roots, mycorrhizas and earthworms on soil physical properties as assessed by shrinkage analysis. *Journal of Hydrology*, 373(3-4), 499-507.

- Molina, V., Pando, M., Jurado, E., Cantú, I. & Alanís, E. (2013). Costras biológicas del suelo en pastizales gipsófilos del noreste de México. *Ciencia UANL*, 16(63), 89-97.
- Molina, V., Pando, M., Marmolejo, J. & Alanís, E. (2014). Diversidad de costras biológicas del suelo en pastizales halófilos del norte de México. *Rev Iberoam Ciencias*, 1(7), 83-92.
- Nava, J., Gutiérrez, E., Herrera, R., Zavala, F., Olivares, E., Treviño, J., Bernal, H. & Valdés, C. (2013). Rendimiento y composición química del pasto CT-115 (*Pennisetum purpureum*) establecido a dos densidades y en dos fechas de siembra en Marín, Nuevo León, México. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 47(4), 419-424.
- Nehrani, S., Askari, M., Saadat, S., Delavar, M., Taheri, M., & Holden, N. (2020). Quantification of soil quality under semi-arid agriculture in the northwest of Iran. *Ecological Indicators*, 108, 105770.
- Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000. (2000). Que Establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis. Diario Oficial de la Federación. México.
- Norris, C., Maynard, D., Hogg, K., Benton, R., Titus, B. & Curran, M. (2015). Ten-year results of seedling growth on calcareous soils in the interior of British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 346, 65-80.
- Ortiz, C. (2019). Edafología. México: Trillas. 327p.

- Palerm, J., Collado, J. & Rodríguez, B. (2010). Retos para la administración y gestión del agua de riego. *El agua en México: cauces y encauces*, 141-178.
- Palma, D., Zavala, J., Bautista, F., Morales, M., López, A., Shirma, E., Sánchez, R., Peña, A. & Tinal, S. (2017). Clasificación y cartografía de suelos del estado de Campeche, México. *Agro productividad*, 10(12), 71-78.
- Pissani, J., Araujo, J. & Garza, J. (1994). Estudio Agroecológico Semi-Detallado del Campo Experimental de la FA UANL, Marín, N.L. Departamento de Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 86 p.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas Para el Medio Ambiente). (2002). Síntesis GEO-3. Perspectivas del medio ambiente mundial 3. Recuperado el 13 de noviembre del 2021 de http://www.unep.org/geo/GEO3/pdfs/GEO3_Synthesis_spa.pdf.
- Porta J., López M. & Poch R. (2013). Edafología: uso y protección de suelos. Tercera edición. Editorial Mundi-Prensa. Madrid. 607 p.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122-137.
- Ramírez, R. (1997). Propiedades físicas químicas y biológicas de los suelos. Ministerio de Agricultura y Fondo Nacional Cerealista. Colombia. 24 p.

- Ramarao, M., Sanjay, J., Krishnan, R., Mujumdar, M., Bazaz, A., & Revi, A. (2019). On observed aridity changes over the semiarid regions of India in a warming climate. *Theoretical and applied climatology*, 136(1), 693-702.
- Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., Bruggeman, A., farahani, J. & Qiang, Z. (2010). Managing water in rainfed agriculture—the need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management*, 97(4), 543-550.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce, J., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. *Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay*. 68 p.
- SAGARPA (2015). Agenda Técnica Agrícola de Nuevo León. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Segunda edición. México. 344 p.
- Saldívar, F., Zárate, F., Ibarra, H. & Garza, C. (2004). Establecimiento y utilización de praderas de zacate buffel. II Symposium Internacional sobre Producción y Manejo de Zacate Buffel. XVI Congreso Nacional SOMMAP. Monterrey, N. L., México. p. 98
- Sánchez, P., Palm, C., & Buol, S. (2003). Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114(3-4), 157-185.

- SEMANART-COLPOS. (2002). Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250,000. *Memoria Nacional, SEMARNAT-Colegio de Posgraduados, México.*
- Shi, Z., Fang, N., Wu, F., Wang, L., Yue, B. & Wu, G. (2012). Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal Hydrol.* 454-455, 123-130.
- SIAP. (2019). Nuevo León Infografía agrolimentaria 2019. Servicio de información Agrolimentaria y Pesquera (SIAP). México. 56 p.
- Šimanský, V., Horák, J., & Bordoloi, S. (2022). Improving the soil physical properties and relationships between soil properties in arable soils of contrasting texture enhancement using biochar substrates: Case study in Slovakia. *Geoderma Regional*, 28, e00443.
- SMN. (2010). Normales Climatológicas del estado de Nuevo León, Estación Ejido Marín, Periodo 1951-2010. Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Recuperado noviembre 2021: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=nl>
- Soil Survey Staff. (2014). Claves para la Taxonomía de Suelos, Decima segunda Edición. Trad. Departamento de Agricultura de USA. 410 p.
- Sosa, J., Camargo, S., Herrera, M., & Godinez, H. (2022). Rainfed agriculture and firewood extraction modify differently the taxonomic and functional structure of biocrusts in a tropical semiarid region. *Geoderma*, 406, 115459.

- Sun, Y., Guo, W., Weindorf, D., Sun, F., Deb, S., Cao, G., Neupane, J., Lin, Z. & Raihan, A. (2021). Field-scale spatial variability of soil calcium in a semi-arid region: Implications for soil erosion and site-specific management. *Pedosphere*, 31(5), 705-714.
- Tunçay, T., Kılıç, Ş., Dedeoğlu, M., Dengiz, O., Başkan, O., & Bayramin, İ. (2021). Assessing soil fertility index based on remote sensing and gis techniques with field validation in a semiarid agricultural ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 190, 104525.
- Upton, R., Bach, E. & Hofmockel, S. (2019). Spatio-temporal microbial community dynamics within soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 132, 58-68.
- Van Reeuwijk L. (2002). Procedures for Soil Analysis, International Soil Reference and Information Centre-Food and Agriculture Organization of the United Nations. 119 p.
- Villaseñor, D., Chabla, J., & Luna, E. (2015). Caracterización física y clasificación taxonómica de algunos suelos dedicados a la actividad agrícola de la provincia de El Oro. *Cumbres*, 1(2), 28-34.
- Volverás, B., Merchancano, J., Campo, J. & López, J. (2020). Propiedades físicas del suelo en el sistema de siembra en wachado en Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 31(3), 743-760.

- Williams, H., Zavala, F., Arcos, G., Rodríguez, M. & Olivares, E. (2017). Características agronómicas asociadas a la producción de bioetanol en genotipos de sorgo dulce. *Agronomía Mesoamericana*, 28(3), 549-563.
- Wu, G., Zhang, Z., Wang, D., Shi, Z. & Zhu, Y. (2014). Interactions of soil water content heterogeneity and species diversity patterns in semi-arid steppes on the Loess Plateau of China. *Journal Hydrol.* 519, 1362-1367.
- Yadav, S., & Lal, R. (2018). Vulnerability of women to climate change in arid and semi-arid regions: The case of India and South Asia. *Journal of Arid Environments*, 149, 4-17.
- Yang, M., Mouazen, A., Zhao, X. & Guo, X. (2019). Assessment of a soil fertility index using visible and near-infrared spectroscopy in the rice paddy region of southern China Eur. *Journal Soil Science*. 10.1111/ejss.12907.
- Ye, S., Ren, S., Song, C., Cheng, C., Shen, S., Yang, J. & Zhu, D. (2022). Spatial patterns of county-level arable land productive-capacity and its coordination with land-use intensity in mainland China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 326, 107757.
- Yerena, J., Pérez, J., Rodríguez, E., Calderón, O., Tagle, M. & Garza, E. (2014). Dinámica de la captura de carbono en pastizales abandonados del noreste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17(1), 113-121.

A N E X O S

Perfil de suelo de la Serie Marín (Perfil 4).

Localidad: Facultad de Agronomía, Marín, N.L.

Elevación: 359.756 msnm.

Relieve: Convexa-Regular.

Drenaje superficial: Normal.

Uso de Tierra: Agostadero.

Material Parental: Sedimentario.

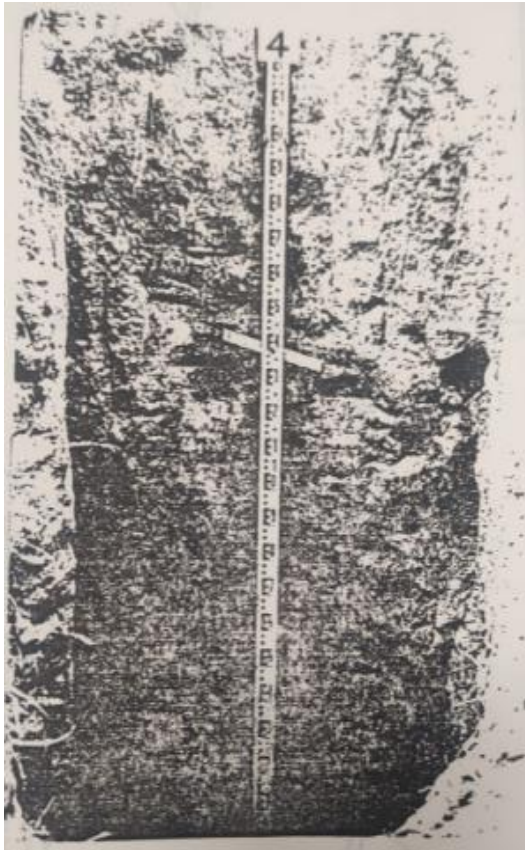


Figura 16. Perfil de Suelo de la Serie Marín (Pissani *et al.*, 1994).

Ap (0-22 cm): Café en seco y café oscuro en húmedo, migajón arcillo-arenoso estructura poliédrica subangular muy fina, consistencia blanda en seco, muy friable en húmedo, porosidad buena, permeabilidad rápida, fuerte reacción al HCL, raíces comunes, finas y delgadas.

Ac (22-38 cm): Café en seco y café oscuro en húmedo, migajón arcillo-arenoso, estructura poliédrica subangular fina, consistencia blanda en seco, muy friable en húmedo, porosidad buena, permeabilidad rápida, fuerte reacción al HCL, raíces comunes, finas y delgadas.

C₁ (38-128/130 cm): Café pálido en seco y café en húmedo, franco, estructura poliédrica subangular fina, consistencia ligeramente duro en seco y muy friable en húmedo, porosidad regular, permeabilidad rápida, fuerte reacción al HCL, raíces muy pocas y finas.

C₂ (128/130-260 cm): Café muy pálido en seco y café amarillento en húmedo, migajón arcilloso, estructura poliédrica subangular media, consistencia ligeramente duro en seco, muy friable en húmedo, porosidad regular, permeabilidad rápida y fuerte reacción al HCL, no hay raíces.

Perfil de suelo de la Serie Zuazua (Perfil 5).

Localidad: Facultad de Agronomía, Marín, N.L.

Elevación: 362.805 msnm.

Relieve: Regular.

Drenaje superficial: Normal.

Uso de Tierra: Agricultura de Temporal.

Material Parental: Sedimentario.



Ap (0-30 cm): Café grisaseo en seco y café grisaseo muy oscuro en húmedo, arcilloso, estructura poliédrica subangular media, blando en seco y friable, pegajoso y plástico en húmedo, porosidad regular, permeabilidad moderada, fuerte reacción al HCL, raíces comunes finas y delgadas.

B₁ (30-64/66 cm): Café grisaseo en seco y café grisaseo muy oscuro en húmedo, arcilloso, estructura poliédrica angular grande, muy duro en seco, friable, pegajoso y plástico en húmedo, porosidad regular, permeabilidad moderada, fuerte reacción al HCL, raíces muy raras y finas.

Bc (64/66-90/94 cm): Café pálido en seco y café en húmedo, arcilloso, estructura poliédrica angular media, duro en seco, muy firme, pegajoso y plástico en húmedo, porosidad regular, permeabilidad moderada, fuerte reacción al HCL, no hay raíces.

C (90/94-220/224 cm): Café muy pálido en seco y café amarillento en húmedo, arcilloso, estructura poliédrica angular media, duro en seco, friable, pegajoso y plástico en húmedo, abundantes carbonatos de calcio, porosidad regular, permeabilidad moderada, fuerte reacción al HCL, no hay raíces.

Figura 17. Perfil de Suelo de la Serie Zuazua (Pissani *et al.*, 1994).

Cuadro 6. Análisis físicos y químicos del perfil de suelo 2 (actual seco) (Pissani *et al.*, 1994).

Símbolo del horizonte	Profundidad (cm)	Clase textural	Color en laboratorio		pH H ₂ O 2:1	N %
			Seco	Húmedo		
Ap	0-31	Arcilloso	10YR 6/2	10YR 4/2	8.3	0.03
B ₁	31-54/72	Arcilloso	10YR 6/3	10YR 4/3	8.6	0.09
Bc	54/72-204	Arcilloso	10YR 6/4	10YR 4/4	8.9	0.01
C	204-224	Arcilloso	10YR 6/4	10YR 4/4	8.9	0.06

Símbolo del horizonte	Profundidad (cm)	CO	MO	CE	P olsen	K ⁺	PSB
		%	%	Mmhos/cm	mgKg ⁻¹	Kg/ha	%
Ap	0-31	0.40	0.7	0.2	4.5	195	>100
B ₁	31-54/72	0.92	1.6	0.3	4.6	171	>100
Bc	54/72-204	0.05	0.1	0.8	4.7	146	>100
C	204-224	0.58	1.0	0.1	4.7	171	>100

Clasificación WRB: Haplic Calcisols (*Aric, Clayic, Ochric*).

Clasificación Soil Taxonomy: *Typic Haplocalcids*.

Cuadro 7. Análisis físicos y químicos del perfil de suelo 6 (actual riego) (Pissani *et al.*, 1994).

Símbolo del horizonte	Profundidad (cm)	Clase textural	Color en laboratorio		pH H ₂ O 2:1	N %
			Seco	Húmedo		
Ap	0-40	Arcilloso	10YR 5/2	10YR 3/2	8.4	0.15
B ₁	40-64/67	Arcilloso	10YR 6/3	10YR 4/3	8.4	0.08
Bc	64/67-120	Arcilloso	10YR 6/3	10YR 4/3	8.4	0.01
C	120-176	Arcilloso	10YR 7/3	10YR 5/3	8.2	0.03

Símbolo del horizonte	Profundidad (cm)	CO	MO	CE	P olsen	K ⁺	PSB
		%	%	Mmhos/cm	mgKg ⁻¹	Kg/ha	%
Ap	0-40	2.14	3.7	1.2	4.2	171	>100
B ₁	40-64/67	1.21	2.1	1.0	4.8	97	>100
Bc	64/67-120	0.11	0.2	0.8	4.2	146	>100
C	120-176	0.34	0.6	0.6	4.4	112	>100

Clasificación WRB: Calcic Kastanozems (*Aric, Clayic, Ochric*).

Clasificación Soil Taxonomy: *Ustic Haplocambids*

Cuadro 8. Análisis físicos y químicos del perfil de suelo 10 (actual pastizal) (Pissani *et al.*, 1994).

Símbolo del horizonte	Profundidad (cm)	Clase textural	Color en laboratorio		pH H ₂ O 2:1	N %
			Seco	Húmedo		
Ap	0-43/47	Arcillo Limoso	10YR 7/3	10YR 5/3	8.4	0.07
Ac	43/47-56/58	Migajón Arcilloso	10YR 6/3	10YR 4/3	8.6	0.07
C ₁	56/58-88/93	Arcilloso	10YR 5/2	10YR 3/2	8.2	0.01
C ₂	88/93-148	Arcilloso	10YR 6/3	10YR 4/3	8.4	0.02

Símbolo del horizonte	Profundidad (cm)	CO	MO	CE	P olsen	K ⁺	PSB
		%		Mmhos/cm	mgKg ⁻¹	Kg/ha	%
Ap	0-43/47	0.87	1.5	2.6	4.8	292	>100
Ac	43/47-56/58	0.81	1.4	2.6	4.3	171	>100
C ₁	56/58-88/93	0.11	0.2	0.8	4.3	78	>100
C ₂	88/93-148	0.34	0.6	0.8	4.5	81	>100

Clasificación WRB: Haplic Calcisols (*Aric, Clayic, Ochric*).

Clasificación Soil Taxonomy: *Typic Haplocalcids*.