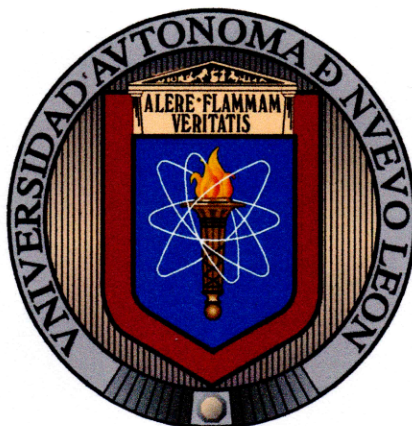


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE SUELOS DE LA
REGIÓN CITRÍCOLA DE NUEVO LEÓN

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

PRESENTA

TERESA YASMIN URIBE LÓPEZ

LINARES, N.L.

JUNIO 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

La Tesis

MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE SUELOS DE LA
REGIÓN CITRÍCOLA DE NUEVO LEÓN

que presenta

TERESA YASMIN URIBE LÓPEZ

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.

DR. FERNANDO VELASCO TAPIA

DIRECTOR DE TESIS

LINARES, N.L.

JUNIO 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

La Tesis

MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE SUELOS DE LA
REGIÓN CITRÍCOLA DE NUEVO LEÓN

que presenta

TERESA YASMIN URIBE LÓPEZ

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Vo. Bo.


DRA. MARÍA INÉS YAÑEZ DÍAZ
CO-DIRECTORA EXTERNA

LINARES, N.L.

JUNIO 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

La Tesis

MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE SUELOS DE LA
REGIÓN CITRÍCOLA DE NUEVO LEÓN

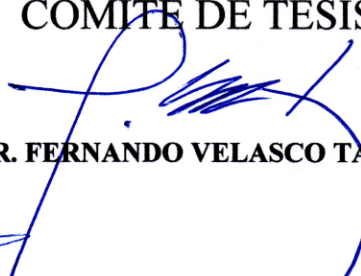
que presenta

TERESA YASMIN URIBE LÓPEZ

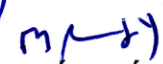
HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.
COMITÉ DE TESIS


DR. FERNANDO VELASCO TAPIA


DR. JORGE ALAN SALINAS JASSO


DRA. MARÍA INÉS YAÑEZ DÍAZ

LINARES, N.L.

JUNIO 2026

MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE SUELOS DE LA REGIÓN CITRÍCOLA DE NUEVO LEÓN

PRESENTA

TERESA YASMIN URIBE LÓPEZ

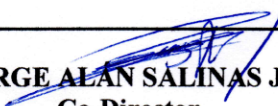
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Aprobación de la Tesis:



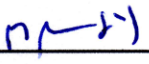
DR. FERNANDO VELASCO TAPIA

Director de Tesis



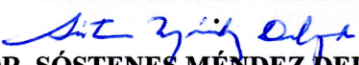
DR. JORGE ALÁN SALINAS JASSO

Co-Director



DRA. MARÍA INÉS YAÑEZ DÍAZ

Co-Directora



DR. SÓSTENES MÉNDEZ DELGADO

Subdirector de Posgrado

LINARES, N.L.

JUNIO 2026

A través de este medio, declaro bajo protesta que este trabajo ha sido realizado de manera personal y utilizando únicamente los medios, equipos, procedimientos y apoyo del comité de titulación, descritas en el mismo.

TERESA YASMIN URIBE LÓPEZ

JUNIO 2026

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a la comunidad neurodivergente.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, a mis padres, **María Teresa y Reynaldo** y mi hermana **Yareli**, por acompañarme, por su apoyo y por animarme cuando pensaba que no podría hacerlo.

Agradezco a mi Director de Tesis, el **Dr. Fernando Velasco Tapia**, por todo su tiempo, dedicación, atención y muchísima paciencia durante todo el proyecto. Estoy sumamente agradecida por todo.

Agradezco a la **Dra. María Inés Yañéz Díaz** de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL, por fungir como Co-directora Externa de la Tesis y por recibirme en su laboratorio para aprender a realizar la fisicoquímica correctamente.

Agradezco al **Dr. Jorge Alan Salinas Jasso** por su ayuda en el trabajo de campo, sus consejos en el área de estudio y en las correcciones del trabajo de gabinete.

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo de beca de Maestría.

Agradezco a la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, por apoyo para efectuar las actividades de campo, por todo lo aprendido y lo vuelto a aprender dentro de las aulas y por la oportunidad de seguir creciendo dentro de una maestría.

Agradezco a la Ing. Ana María Garza Castillo, por su apoyo en el laboratorio de geoquímica. Agradezco a la Facultad de Ciencias Forestales, UANL, por su apoyo para efectuar el análisis fisicoquímico de muestras de suelo.

Agradezco a la Dra. Patricia Quintana Owen (CINVESTAV-IPN; Mérida, Yuc.) por su apoyo para realizar el análisis de difracción de rayos-X.

Agradezco al Dr. Reneé González Guzmán (División de Ciencias de la Tierra, CICESE; Ensenada, B.C.) por su apoyo para realizar el análisis químico de elementos mayores por XRF.

Agradezco a la M.C. Ofelia Pérez Arvizu (Instituto de Geociencias, UNAM; Juriquilla, Qro.) por su apoyo para realizar el análisis químico de elementos traza por ICP-MS.

Finalmente, agradezco a mis amistades, a las antiguas y las nuevas que me han acompañado, aconsejado y me han dado su apoyo desinteresado en los momentos difíciles y en los buenos momentos.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Página
Lista de Tablas	III
Lista de Figuras	IV
Resumen	VII
Abstract	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 El suelo: definición, clasificación e impacto en el desarrollo sostenible	1
1.1.1 Esquema “Taxonomía de suelos”	2
1.1.2 Esquema “Base Referencial Mundial (WRB)”	3
1.2 Tipos de suelos en México	4
1.3 Región Citrícola de Nuevo León	4
1.4 Objetivo de la tesis	9
1.5 Referencias	9
2. MARCO FISIOGRAFICO	11
2.1 Ubicación del área de estudio	11
2.2 Geología	12
2.2.1 Sierra Madre Oriental	13
2.2.2 Cuaternario	15
2.3 Clima	17
2.4 Vegetación	19
2.5 Referencias	20
3. METODOLOGÍA	22
3.1 Plan general de trabajo	22
3.2 Localización y muestreo en perfiles de suelo	22
3.3 Análisis fisicoquímico	24
3.3.1 Análisis de textura	24
3.3.2 Análisis de color	25
3.3.3 pH	25

3.3.4	<i>Análisis de conductividad eléctrica</i>	26
3.3.5	<i>Análisis de contenido de materia orgánica</i>	26
3.3.6	<i>Análisis elemental de carbono total</i>	27
3.4	Análisis mineralógico	27
3.4.1	<i>Separación de fracción arcillosa (< 2 μm)</i>	27
3.4.2	<i>Análisis de difracción de rayos-X</i>	28
3.5	Análisis geoquímico	29
3.6	Referencias	31
4.	RESULTADOS	32
4.1	Perfil La Gorgonia	32
4.1.1	<i>Descripción del perfil edafológico</i>	32
4.1.2	<i>Parámetros fisicoquímicos, mineralógicos y geoquímicos</i>	34
4.2	Perfil La Nutria	37
4.2.1	<i>Descripción del perfil edafológico</i>	37
4.2.2	<i>Parámetros fisicoquímicos, mineralógicos y geoquímicos</i>	38
4.3	Perfil El Poblado	42
4.3.1	<i>Descripción del perfil edafológico</i>	42
4.3.2	<i>Parámetros fisicoquímicos, mineralógicos y geoquímicos</i>	43
4.4	Perfil Las Raíces	45
4.4.1	<i>Descripción del perfil edafológico</i>	45
4.4.2	<i>Parámetros fisicoquímicos, mineralógicos y geoquímicos</i>	48
4.5	Referencias	50
5.	DISCUSIÓN	51
5.1	Clasificación de perfiles de suelo de acuerdo con esquema WRB	51
5.2	Variación de parámetros fisicoquímicos durante la pedogénesis	52
5.3	Variación de parámetros geoquímicos durante la pedogénesis	55
5.4	Referencias	69
CONCLUSIONES		71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Regla nomenclatural del esquema “ <i>Taxonomía de suelos</i> ” (Porta Casanellas et al., 2014)	2
Tabla 4.1	Parámetros fisicoquímicos del perfil La Gorgonia (Linares, N.L.)	34
Tabla 4.2	Composición geoquímica (elementos mayores en % peso y elementos traza en ppm) de horizontes del perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L.	36
Tabla 4.3	Parámetros fisicoquímicos del perfil La Nutria (Linares, N.L.)	39
Tabla 4.4	Composición geoquímica (elementos mayores en % peso y elementos traza en ppm) de horizontes del perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L.	41
Tabla 4.5	Parámetros fisicoquímicos del perfil El Poblado (Linares, N.L.)	43
Tabla 4.6	Composición geoquímica (elementos mayores en % peso y elementos traza en ppm) de horizontes del perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L.	46
Tabla 4.7	Parámetros fisicoquímicos del perfil Las Raíces (Linares, N.L.)	48
Tabla 4.8	Composición geoquímica (elementos mayores en % peso y elementos traza en ppm) de horizontes del perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L.	49
Tabla 5.1	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L. (GOR01 → GOR02).	59
Tabla 5.2	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L. (GOR01 → GOR03).	59
Tabla 5.3	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L. (GOR01 → GOR04).	59
Tabla 5.4	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L. (LUN01 → LUN02).	60
Tabla 5.5	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L. (LNU01 → LNU03).	60
Tabla 5.6	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L. (LNU01 → LNU04).	60
Tabla 5.7	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L. (EP01 → EP02).	61
Tabla 5.8	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L. (EP01 → EP03).	61
Tabla 5.9	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L. (EP01 → EP04).	61
Tabla 5.10	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L. (EP01 → EP05).	62
Tabla 5.11	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L. (RAI01 → RAI02).	62
Tabla 5.12	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L. (RAI01 → RAI03).	62
Tabla 5.13	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L. (RAI01 → RAI04).	63
Tabla 5.14	Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L. (RAI01 → RAI05).	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Modelo general de un perfil de suelo y de los horizontes que lo componen (Mirsal, 2004).	1
Figura 1.2	Tipos de suelo en México de acuerdo con el esquema FAO-UNESCO (INEGI, 2007).	4
Figura 1.3	Mapa de la Región Citrícola de Nuevo León que incluye los municipios que la constituyen	6
Figura 2.1	Mapa de ubicación del área de estudio dentro de la Región Citrícola de Nuevo León (Ledesma-Ruiz et al., 2015). Este incluye las localidades donde se han levantado perfiles de suelo: (a) La Gorgonia: 14R0418142 / 2754906, (b) La Nutria: 14R0423723 / 2455225, (c) El Poblado: 14R0422650 / 2752954 y (d) Las Raíces: 14R0434863 / 2747240.	11
Figura 2.2	Mapa geológico general del estado de Nuevo León (Montalvo-Arrieta et al., 2011). La Región Citrícola se caracteriza por mostrar litologías asociadas al flanco E de la Sierra Madre Oriental y a los depósitos del Paleógeno al Reciente de la Llanura Costera del Golfo Norte.	12
Figura 2.3	Columna estratigráfica general para la Sierra Madre Oriental (Jenchen, 2007).	14
Figura 2.4	Esquema general del área de Linares-Hualahuises, que incluye las principales zonas de aporte de sedimentos, la Sierra Madre Oriental y la Sierra de San Carlos, así como los elementos que conforman el sistema de drenaje (Ruiz-Martínez y Werner, 1997).	15
Figura 2.5	Distribución espacial de tipos de suelo en La Región Citrícola de Nuevo León (Pando Moreno y López López, 2014).	16
Figura 2.6	Análisis de granulometría para diferentes tipos de suelo en la región de Linares y Hualahuises (Durán Saldaña, 2015).	17
Figura 2.7	Variación de la temperatura media, máxima y mínima en la estación climatológica La Laja, Hualahuises, N.L. (1979 – 2024).	18
Figura 2.8	Variación de la precipitación (mm) y evaporación (mm) en la estación climatológica La Laja, Hualahuises, N.L. (1979 – 2024).	19
Figura 3.1	Esquema metodológico para estudio de perfiles de suelo en el área de Linares.	22
Figura 3.2	Localización de sitios de muestreo de perfiles de suelo en el área de Hualahuises – Linares, dentro de la Región Citrícola de Nuevo León. Adicionalmente, se incluye la ubicación de perfiles de suelo reportados por INEGI (2025) .	23
Figura 3.3	Determinación de textura de suelos utilizando el método de Bouyoucos (Porta et al., 2011).	24
Figura 3.4	Determinación de color de muestra de suelo (en condiciones secas y en húmedas) utilizando el esquema de Munsell (Porta et al., 2011).	25
Figura 3.5	Equipo de medición de pH y conductividad eléctrica en muestras de suelo mezcladas con una solución de CaCl_2 0.01 M.	26
Figura 3.6	Determinación de contenido de materia orgánica en muestras de suelo por el método de Walkley y Black (1934) .	27
Figura 3.7	Equipo calcímetro para determinación de carbono total en muestras de suelo por titulación con HCl.	28
Figura 3.8	Difractómetro <i>D8 Advance</i> (Bruker) para identificación de especies minerales en muestras de suelo.	29

Figura 3.9	Imagen de un sistema Q-ICP-MS Thermo ICap Qc para análisis de elementos traza en muestras de suelo.	30
Figura 4.1	Estructura del perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L.	32
Figura 4.2	Panorámica del perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L.	33
Figura 4.3	Esquema del perfil de suelo La Gorgonia (Linares, N.L.), con la distribución de horizontes y dimensiones.	33
Figura 4.4	Patrones de difracción de rayos-X para los horizontes del perfil La Gorgonia. Radiación $\text{CuK}\alpha$, 1.54060 Å, Barrido = 3-70°, Velocidad = 2°/min.	35
Figura 4.5	Estructura del perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L.	37
Figura 4.6	Afloramiento de roca madre intemperizada del perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L.	37
Figura 4.7	Esquema del perfil de suelo La Nutria (Linares, N.L.), con la distribución de horizontes y dimensiones.	38
Figura 4.8	Patrones de difracción de rayos-X para los horizontes del perfil La Gorgonia. Radiación $\text{CuK}\alpha$, 1.54060 Å, Barrido = 3-70°, Velocidad = 2°/min.	40
Figura 4.9	Estructura del perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L.	42
Figura 4.10	Esquema del perfil de suelo El Poblado (Linares, N.L.), con la distribución de horizontes y dimensiones.	43
Figura 4.11	Fases minerales en roca total de muestras del perfil de suelo El Poblado.	44
Figura 4.12	Estructura del perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L.	47
Figura 4.13	Esquema del perfil de suelo Las Raíces (Linares, N.L.), con la distribución de horizontes y dimensiones.	47
Figura 5.1	Distribución de perfiles de suelo y clasificación descritos en la literatura y este trabajo dentro de la Región Citrícola de Nuevo León.	51
Figura 5.2	Clasificación por tamaño de partícula para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.	52
Figura 5.3	Variación de pH y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.	53
Figura 5.4	Variación de pH y materia orgánica (%) para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.	54
Figura 5.5	Variación de Carbonatos (%) y carbón orgánico (%) para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.	55
Figura 5.6	(a) Diagrama ternario $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3$ y (b) Diagrama ternario $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.	57
Figura 5.7	Variación de las relaciones (a) $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y (b) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}/\text{MgO}$ para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.	58
Figura 5.8	(a) Porcentaje de pérdida global de elementos mayores y (b) Porcentaje de ganancia de Ca durante el desarrollo de perfiles de suelo de la Región Citrícola: GOR = La Gorgonia, LNU = La Nutria, EP = El Poblado y RAI = Las Raíces. Cálculos de acuerdo con el modelo de Faure (1997) y considerando al Al_2O_3 como una especie inmóvil.	64

Figura 5.9	Diagrama de parámetro de movilidad $D_i = (TiO_2/C_i)_{HX}/(TiO_2/C_i)_{H1}$ para el perfil de suelo La Gorgonia (GOR), donde C_i representa la concentración del elemento traza i en la roca madre H1 y en los horizontes HX (2 a 4) que le sobreyacen. Grupos de elementos traza: (a) LILE, (b) REE, (c) HFSE, (d) SV, (e) 1°ST y (f) 2°ST.	66
Figura 5.10	Diagrama de parámetro de movilidad $D_i = (TiO_2/C_i)_{HX}/(TiO_2/C_i)_{H1}$ para el perfil de suelo La Nutria (LNU), donde C_i representa la concentración del elemento traza i en la roca madre H1 y en los horizontes HX (2 a 4) que le sobreyacen.	67
Figura 5.11	Diagrama de parámetro de movilidad $D_i = (TiO_2/C_i)_{HX}/(TiO_2/C_i)_{H1}$ para el perfil de suelo El Poblado (EP), donde C_i representa la concentración del elemento traza i en la roca madre H1 y en los horizontes HX (2 a 5) que le sobreyacen.	68
Figura 5.12	Diagrama de parámetro de movilidad $D_i = (TiO_2/C_i)_{HX}/(TiO_2/C_i)_{H1}$ para el perfil de suelo Las Raíces (RAI), donde C_i representa la concentración del elemento traza i en la roca madre H1 y en los horizontes HX (2 a 5) que le sobreyacen.	68
Figura 5.13	Patrones de lantánidos normalizados a condrita para los horizontes de suelo de los perfiles (a) La Gorgonia, (b) La Nutria, (c) El Poblado y (d) Las Raíces.	69

RESUMEN

El suelo es un cuerpo natural que representa el producto de la influencia del clima, la topografía y los organismos sobre rocas parentales, siendo el medio a partir del cual se genera la vegetación. En el presente trabajo de Tesis se reporta la revisión del marco geológico, climatológico y edafológico para la Región Citrícola de Nuevo León, así como los tipos de suelo principales y su distribución en el espacio. El documento incluye información sobre la estructura y parámetros fisicoquímicos y geoquímicos para cuatro perfiles de suelo localizados en el municipio de Linares, N.L. De esta forma se colectaron ~1.5 kg de cada uno de los estratos que constituyen cada perfil (GOR: leptosol La Gorgonia, LNU: vertisol La Nutria, EP: cambisol/fluvisol El Poblado y RAI: leptosol/fluvisol Las Raíces). Las muestras fueron pulverizadas a fin de llevar a cabo el siguiente programa analítico (a) parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad eléctrica, análisis de textura y concentración de materia orgánica; (b) separación de la fracción de $< 2 \mu\text{m}$ (arcillas), (c) arreglo de minerales por difracción de rayos X (XRD) en muestra original y en fracción de arcillas, (d) determinación de composición en elementos mayores por fluorescencia de rayos-X (XRF) y elementos traza a través de espectrometría de masas inductivamente acoplada con plasma (ICP-MS). A partir de esta información, se efectuó una comparación con los intervalos de composición mundiales reportados en la literatura para los tipos de suelo bajo estudio. Además, se efectuó un análisis sobre la movilidad elemental durante la formación del perfil edafológico, en el cual Al_2O_3 y TiO_2 se han considerado como especies inmóviles. El análisis reveló un fenómeno de ganancia de masa, por acumulación de carbonatos y arcilla, acompañado de una movilidad restringida durante el desarrollo edafológico.

ABSTRACT

Soil is a natural body that denotes the product of climate, topography and living organism influence over parental rocks, being the support of vegetation. This thesis document reports a review of the geological, climatological, and edaphic framework for the Nuevo León Citrus Region, including the description of the main soil types previously reported and its spatial distribution. The document includes information about the structure and physicochemical and geochemical parameters of four soil profiles located in the Linares, N.L. municipality. Approximately 1.5 kg of soil from each horizon of the profile were collected (GOR: leptosol La Gorgonia, LNU: vertisol La Nutria, EP: cambisol/fluvisol El Poblado, and RAI: leptosol/fluvisol Las Raíces). The collected samples were ground to carry out an analytical program: (a) physicochemical tests: pH, electrical conductivity, texture analysis, and organic matter concentration; (b) clay fraction separation ($< 2 \mu\text{m}$), (c) mineralogical arrangement identification by X-ray diffraction in whole rock and clay fraction, and (d) major element chemical contents by X-ray fluorescence (XRF) and trace element concentration by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). A comparison was made with the compositions reported worldwide for the soil types under study. In addition, an evaluation of elemental mobility during soil profile development was performed, considering Al_2O_3 and TiO_2 as immobile species. The analysis revealed a mass gain phenomenon, due to the accumulation of carbonates and clay, accompanied by restricted mobility during soil development.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El suelo: definición, clasificación e impacto en el desarrollo sostenible

Los procesos de alteración mecánica y biogeoquímica de rocas dan como resultado la formación del suelo, situándose en la interfase entre la litósfera y la atmósfera-hidrosfera (Ortiz Solorio, 2015; Blum *et al.*, 2018). Representa una mezcla compleja de minerales, materia orgánica, líquidos, gases y organismos. Es un elemento esencial como soporte y hábitat de la vida y como un sistema almacenador de agua. Se divide en una serie de estratos que representan su evolución mineralógica y química a partir de un material parental.

Una característica típica del suelo es su estructura en horizontes (Figura 1.1; Mirsal, 2004). La identificación de cada estrato puede considerar su textura, la composición mineralógica y química y el color-tonalidad del material. Estas variaciones son reflejo de diferencias en su arreglo de minerales y su composición química, en parámetros que incluyen el pH, la acumulación materia orgánica y de especies metálicas (tal como Fe y Mn), así como las reacciones químicas que ha experimentado.

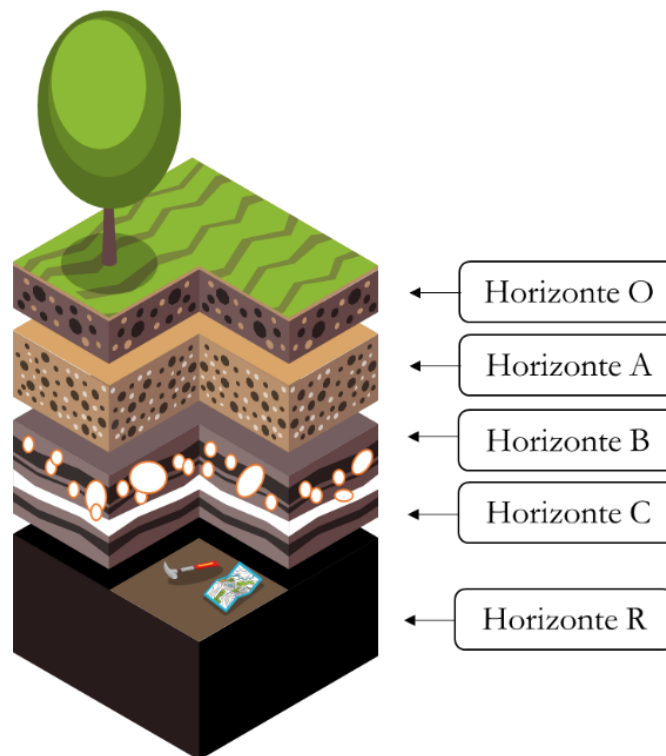


Figura 1.1: Modelo general de un perfil de suelo y de los horizontes que lo componen (Mirsal, 2004).

Los estratos que constituyen un perfil de suelo se caracterizan por un espesor que va de unos cuantos centímetros hasta varios metros. La capa superior es la más expuesta al intemperismo generado por la acción de la lluvia y otros agentes atmosféricos (humedad, viento, temperatura y presión atmosférica). De esta forma, cada estrato inferior se ve afectado en menor medida al intemperismo que el superior inmediato. Por otra parte, los estratos se identifican de acuerdo con su posición dentro del perfil, su composición y su grado de alteración: (a) horizonte R protolito, (b) horizonte C: roca parcialmente degradada, (c) horizonte B: roca degradada con indicios de presencia de materia orgánica, (d) horizonte A: capa de roca altamente degradada con presencia de materia orgánica y (e) horizonte O: estrato dominado por acumulación de materia orgánica (humus).

Por otra parte, la clasificación de los suelos se efectúa a través de dos esquemas: (a) *Taxonomía de suelos* y (b) *Base de referencia mundial*, los cuales se describen brevemente en los siguientes apartados.

1.1.1 Esquema “Taxonomía de suelos”

El esquema considera un sistema jerárquico que incluye orden, suborden, gran grupo, grupo, familia y serie (Tabla 1.1). La asignación considera características físicas, químicas y biológicas de campo y/o laboratorio. Aunque el proceso de génesis es analizado, no se considera un criterio clasificatorio. La nomenclatura considera términos en griego y latín (Porta Casanellas *et al.*, 2014) y considera 12 órdenes: entisoles, inceptisoles, andisoles, gelisoles, histosoles, aridisoles, vertisoles, molisoles, alfisoles, espodosoles, ultisoles y oxisoles.

Tabla 1.1: Regla de nomenclatura del esquema “Taxonomía de suelos” (Porta Casanellas *et al.*, 2014).

Categoría	Regla de nomenclatura
Orden	Raíz + i/o + sol
Suborden	Prefijo + EFO (elemento formador del orden)
Grupo	Prefijo + Nombre del suborden
Subgrupo	Nombre del grupo + calificativo
Familia	Nombre del subgrupo + descriptores
Serie	Nombre local

1.1.2 Esquema “Base Referencial Mundial (WRB)”

En 1980 la Unión Internacional de las Ciencias del Suelo constituyó un equipo que elaboró la Base Internacional de Referencia para Clasificación de Suelos (IRB, por sus siglas en inglés). El organismo modificó su nombre a Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, por sus siglas en inglés) en 1992. En 1998 se publicó la primera edición de la WRB, mientras que la edición más reciente corresponde a 2022 ([IUSS Working Group WRB, 2022](#)). Los principios generales de este esquema incluyen:

- 1) La clasificación considera algunos parámetros de los horizontes y características diagnósticas, los cuales deberían ser medidos y observados en la medida de lo posible.
- 2) Las características diagnósticas tienen una relación con los procesos formadores del suelo. Sin embargo, no deben usarse como criterio de diferenciación definitivo.
- 3) Los parámetros climáticos no son tomados en cuenta. Sin embargo, en combinación con propiedades generales, se utilizan para propósitos interpretativos. De esta forma, la nomenclatura de un determinado suelo no está sujeta a cambios climáticos de orden global o local.
- 4) El esquema ha permitido la unificación de distintos sistemas nacionales de aplicación previa para el proceso de identificación.
- 5) Comprende dos niveles de detalle categórico: (a) el primero considera 32 Grupos de Suelos de Referencia (GSR); (b) el segundo consiste en el nombre del GSR combinado con un conjunto de calificadores principales y suplementarios.
- 6) La mayoría de los GSR en la WRB son representativos de regiones principales, por lo que constituyen una sobrevista de la edafología mundial y permiten la comunicación entre bases de datos globales.
- 7) Las definiciones reflejan las variantes observadas vertical y horizontalmente en los perfiles.
- 8) El sistema utiliza nombres de uso tradicional, aunque permite la incorporación de términos para evitar confusiones y diferentes connotaciones.

Por otra parte, fortalecer la comprensión de las propiedades y los procesos del suelo a escala nacional y regional se consideran retos de la mayor importancia ([Lal et al., 2021](#)), siendo incluidos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas ([ONU, 2018](#)). De acuerdo con [Lal et al. \(2021\)](#), la gestión sostenible de la salud del suelo es importante en los objetivos 1 (Fin de la pobreza), 2 (Hambre cero), 3 (Buena salud y bienestar), 5 (Igualdad de género), 6 (Agua limpia y saneamiento), 7 (Energía asequible y no contaminante), 9 (Innovación industrial e infraestructura), 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), 12 (Consumo y producción responsables), 13 (Acción por el clima) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres).

Es evidente que algunos de los ODS antes mencionados dependen considerablemente de la producción vegetal y otros dependen de los procesos edafológicos: el movimiento del agua, la transferencia de calor, la sorción, la filtración física, el intercambio iónico y las transformaciones bioquímicas y biofísicas. Por lo antes expuesto, es importante el impulsar el estudio regional del sistema suelo en México y especialmente en su región noreste.

1.2 Tipos de suelo en México

De acuerdo con el INEGI (2007), en México aparecen 26 de los 32 grupos de suelo de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2022). Los tipos de suelo dominantes de acuerdo con este reporte incluyen leptosoles (28.3%), regosoles (13.7%), phaeozems (11.7%), calcisoles (10.4%), luvisoles (9%) y vertisoles (8.6%) que, en conjunto, ocupan 81.7% de la superficie nacional (Figura 1.2).

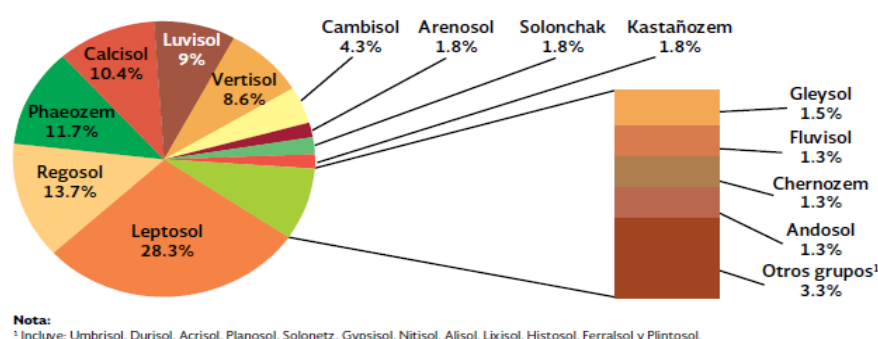


Figura 1.2: Tipos de suelo en México de acuerdo con el esquema FAO-UNESCO (INEGI, 2007).

1.3 Región Citrícola de Nuevo León

Se localiza en la zona centro de la entidad, hacia el SE de Monterrey (Figura 1.3). La delimitación de su área considera procesos territoriales complejos de índole geográfica, social, económica y cultural a lo largo de varios siglos. La zona cubre una superficie de 7209 km² e incluye a los municipios de Allende, Cadereyta, General Terán, Hualahuises, Linares y Montemorelos. Esta área representa ~11.1% de la superficie total de Nuevo León.

De forma particular, las características de su espacio geográfico influyeron para que una población en crecimiento convirtiera a la agricultura en una actividad primordial, basada principalmente en la producción de cítricos a partir de inicios del siglo XX (López López y Pando Moreno, 2014). Pantoja-Zavala y Servín Herrera (2022) reportaron que: (a) estos productos son fuente de vitaminas, minerales y antioxidantes, (b) su cultivo y producción forman parte de una tradición histórica y de identidad regional y (c) representan un gran impacto socioeconómico, que ha beneficiado a más de 67,000 familias de productores, generando 70,000 empleos directos y 250,000

indirectos. De esta forma, estos autores estimaron que para 2024 la producción sería de aproximadamente 10.17 millones de toneladas con una exportación, principalmente hacia los EE. UU., del 32%. Esto representa ~2.78% del PIB agrícola nacional.

Como ya se ha señalado, un factor determinante en la producción agrícola de cualquier región es el tipo de suelo ([Amundson et al., 2015](#)). De acuerdo con el sistema de la FAO-UNESCO, en la Región Citrícola de Nuevo León se presentan diez tipos de suelo ([López López y Pando Moreno, 2014](#)): leptosoles (41.8%), rendzinas (28%), calcisoles (10.3%), vertisoles (9.9%), regosoles (4.3%) y castanozem (3.4%). Tipos de suelos con una cobertura <1% incluyen a feozems, luvisoles, cambisoles, chernozem y fluvisoles. [López López y Pando Moreno \(2014\)](#) los han descrito como sigue:

- 1) *Leptosol*: son suelos de profundidad limitada (espesor < 10 cm), constituidos por un estrato continuo y coherente de roca o un horizonte cementado por carbonato de calcio. Normalmente, se observa a la roca madre y su alteración incipiente. Aparecen en zonas de sierra, lomerío y pie de monte, sobre pendientes abruptas mayores de 30%, o moderadamente abruptas (entre 15 y 30%), lo cual los hace altamente susceptibles a erosión. No se recomiendan para actividades agropecuarias o forestales. Comúnmente aparecen en intervalos altitudinales entre 600 y 750 m, con relieves quebrados a ondulados, mientras que en escarpes se pueden ubicar hasta los 3300 msnm.
- 2) *Rendzina*: aparecen en altitudes >250 msnm y generalmente se forman a partir de una litología carbonatada, preferentemente en el talud del pie de monte medio y bajo de las sierras. Incluyen un horizonte A1 < 20 cm. Sus estratos aparecen en tonalidades oscuras en seco y en color negro en húmedo, con adhesividad y plasticidad moderadas, consistencia friable en húmedo y escasas gravas angulares y subangulares. Puede incluir 2-4% de materia orgánica. Sus horizontes pueden mostrar hasta ~22 meq/100 g de suelo con 100% de saturación de bases como capacidad de intercambio. Estos suelos se caracterizan por un pH ligeramente alcalino (7-8) y reaccionan moderadamente al ácido clorhídrico (HCl). Muestran un drenaje moderado y una fertilidad promedio.

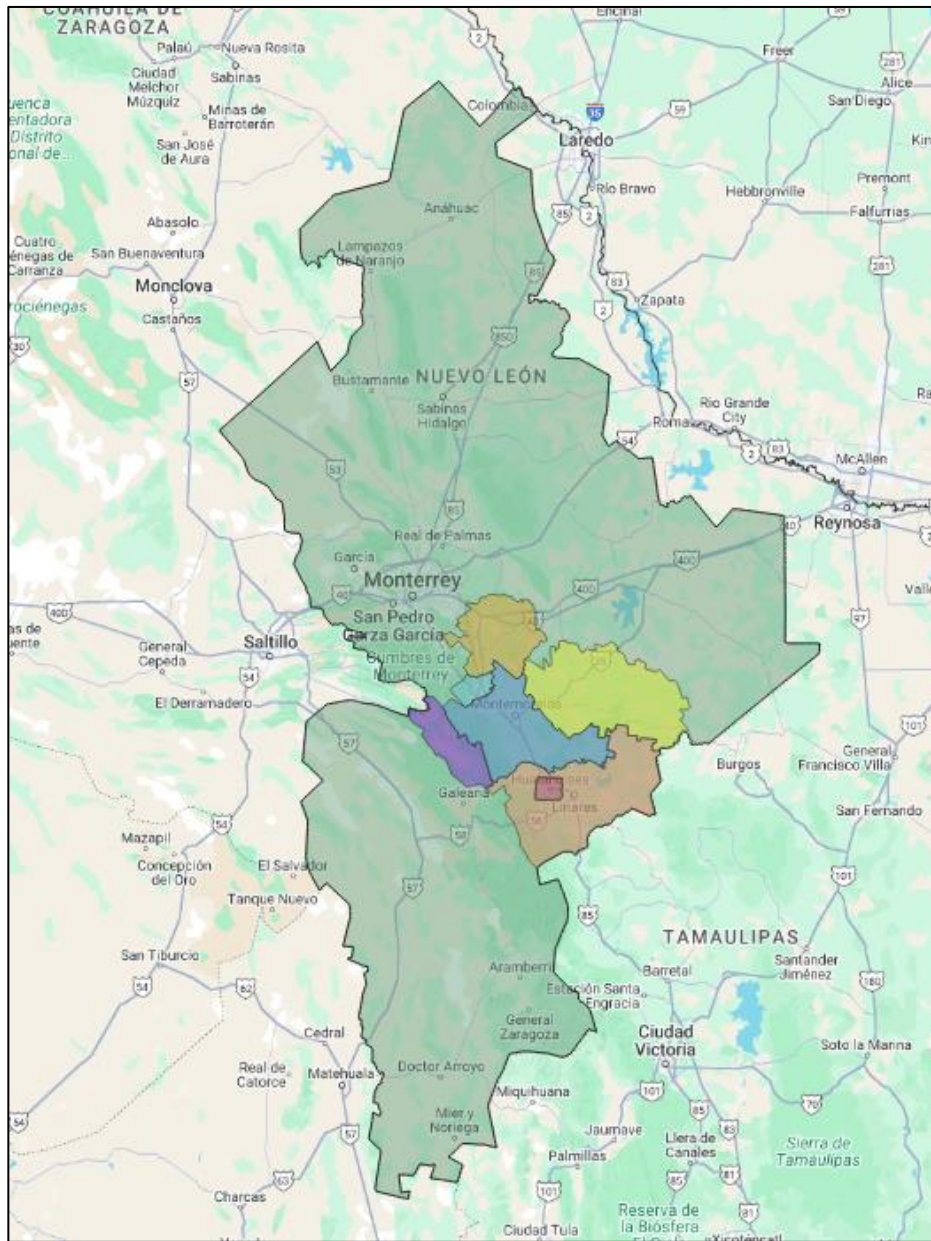


Figura 1.3: Mapa de la Región Citrícola de Nuevo León que incluye los municipios que la constituyen.

- 3) *Calcisol*: ocurren con un espesor superior al metro de profundidad y con un desarrollo moderado. Pueden tener un origen aluvial y eólico, generalmente en planicies onduladas suaves de plataforma central. Incluyen horizontes A1 (<25 cm); B11 (25-60 cm) y B12 (60-100 cm). Sus estratos muestran un color pardo oscuro en estado seco, que tiende a pardo en humedad. Su textura tiende a ser promedio con una adhesividad y plasticidad moderada. Aparece en una estructura de bloques subangulares medios y gravas escasas subangulares y

semi redondeadas. El contenido de materia orgánica varía de 0.3 a 1.5% y la capacidad de intercambio catiónico es de 15 a 20 meq/100 g de suelo con 100% de saturación de bases. Se caracterizan por un pH ligeramente alcalino (pH = 7-8) y reaccionan con intensidad al HCl. Su drenaje tiende a ser moderado a intenso, con una fertilidad relativamente baja.

- 4) *Vertisol*: suelos con profundidades mayores al metro de espesor y con >30% de contenido arcilloso, de origen aluvial, superficialmente agrietados y con una pendiente suave. Su horizonte principal es de tipo A (estratos A11 < 30 cm, A12 = 30 - 60 cm, A13 = 60 - 100 cm). Generalmente ocurren en planicies de plataforma central, sobre pendientes leves. Sus horizontes aparecen en tonos pardo oscuro en seco y pardo en húmedo, de textura fina, con una consistencia firme en húmedo. Muestran una adhesividad y plasticidad intensas, de estructura masiva sin gravas y con acumulación de materia orgánica <1.5%. Su capacidad de intercambio catiónico es de 32 a 35 meq/100g de suelo, con 100% de saturación de bases. Su pH es moderadamente alcalino (pH = 8.0) y reaccionan fuertemente al HCl. Su drenaje es muy lento y, al acumular humedad, muestran una fertilidad adecuada.
- 5) *Kastañozem*: presentan una estructura profunda con un horizonte superior pardo rojizo, rico en materia orgánica (hasta 4%) y en nutrientes. Su estructura incluye estratos A1 (<30 cm) y B2 (30-100 cm). Sus horizontes tienden a aparecer en tonos pardo rojizo en seco y húmedo, con una textura fina (migajón-arcilloso) y consistentes en condiciones húmedas. Su adhesividad y plasticidad son relativamente altas, con una estructura bien desarrollada en bloques subangulares de tamaño medio con <20% de grava. Se caracterizan por 12-15 meq/100g de capacidad de intercambio catiónico y una reacción fuerte al HCl (pH < 8). Muestran una alta capacidad de drenaje y una fertilidad de buena a excelente en condiciones adecuadas de humedad.
- 6) *Feozem*: suelos de formación residual que contienen un estrato superior abundante en materia orgánica (2-3%), textura en migajas a ligeramente arcillosa y una consistencia suave. Incluyen horizontes A1 mólico (<35 cm) y B1 cámbico (35-100 cm). Muestran tonalidades oscuras en condiciones secas y húmedas. Se caracterizan por una adhesividad y plasticidad moderadas. En este tipo se ha registrado una alta capacidad de intercambio catiónico (17 meq/100 g) y reacción fuerte al HCl con un pH alcalino (7-8). Cuentan con una alta capacidad de drenaje, que induciría a una alta fertilidad. Sin embargo, su uso agrícola es restringido, ya que aparece en relieve accidentado y su roca madre se encuentra a <50 cm de profundidad.
- 7) *Luvisol*: Aparecen en bosques templados o matorrales submontanos en las sierras, y matorrales, pastizales o cultivos en las planicies. Por esta razón, requieren de ambientes húmedos para su desarrollo. Se caracterizan por incluir un horizonte ócrico A1 (<25 cm) y

uno argílico B2 (20-70 cm), con tonos pardo amarillento en seco y pardo oscuro en húmedo. Su textura es de tipo migajón arcilloso a arcilloso, con una adhesividad y plasticidad fuertes. Muestran contenidos moderados de materia orgánica. Su capacidad de intercambio catiónico es <15 meq/100 g de suelo, con una reacción al HCl débil ($\text{pH} < 7.5$). Su drenaje y su fertilidad son moderadas.

- 8) *Cambisol*: se caracterizan por un desarrollo limitado, consistente en un horizonte A1 ócrico (< 25 cm) y B cámbico (<30 cm). Presenta acumulación de arcilla, materia orgánica y carbonato de calcio. Sus características incluyen un color pardo rojizo en seco y húmedo; textura migajón-arcilloso; consistencia friable en húmedo: adhesividad y plasticidad moderadas. Además muestran $<15\%$ de grava, con materia orgánica $<3\%$, capacidad de intercambio catiónico <25 meq/100 g de suelo, saturación de bases de 100% y reacción moderada al HCl ($\text{pH} < 8$). Se caracteriza por un alto drenaje. Su uso agrícola es restringido, debido a que se forma en pendientes y a su escasa profundidad (por lo general <55 cm) y su baja o moderada fertilidad, que varía de acuerdo con el contenido de materia orgánica y nutrimentos.
- 9) *Chernozem*: se forman a partir de lutita y conglomerado de grano fino, en sitios con suficiente humedad para sostener una vegetación de gramíneas. Incluyen un horizonte mólico rico en materia orgánica calcificada. Su estrato subyacente es de tipo B de acumulación, en el que existe una precipitación abundante de carbonato de calcio con espesores mayores a 20 cm. Se caracterizan por horizontes de color pardo oscuro en seco y negro en húmedo, textura media a fina, adhesividad y plasticidad de media a moderada, consistencia firme en húmedo, un contenido moderado de gravas subangulares y una alta concentración de materia orgánica ($> 4\%$). Su capacidad de intercambio catiónico es alta (~ 32 meq/100 g de suelo), su saturación de bases es menor a 100%, con un $\text{pH} \sim 8.0$ y reacción fuerte con el HCl. Su drenaje es de moderado a lento y su fertilidad es relativamente alta.
- 10) *Fluvisol*: son un tipo de suelo profundo con más de un metro de espesor. Su formación se debe a depósitos aluviales, recientemente transportados por los principales ríos y arroyos. Presentan un horizonte A (<30 cm), seguido de uno C arenoso (30-100 cm). Generalmente ocurre en estratos gris oscuro a claro en húmedo, con textura gruesa, y consistencia suelta en seco y húmedo. Su adhesividad y plasticidad son nulas. Se presenta sin estructura, con gravas semi redondeadas y un contenido de materia orgánica muy bajo (0.1-0.4%). La capacidad de intercambio catiónico es de 10 a 12 meq/100 g de suelo, con 100% de saturación de bases. Su pH es moderadamente alcalino (<8.5) y con reacción intensa al HCl. Su drenaje es moderado a relativamente alto y su fertilidad natural baja. Estos suelos se presentan en un

amplio espectro altitudinal, principalmente en márgenes de río o en sus lechos, en llanuras aluviales recientes, y con un relieve irregular.

1.4 Objetivo de la tesis

Aunque, de forma general, se conocen los tipos de suelo que predominan en la Región Citrícola del Estado de Nuevo León, su descripción es relativamente limitada. Además, es necesario conocer con mayor detalle sus propiedades mineralógicas y geoquímicas a fin de contar con modelos geopedológicos que expliquen su génesis y desarrollo (Amundson, 2010).

El presente estudio ha tenido como propósito el contribuir a un mayor entendimiento sobre el origen y desarrollo de diferentes tipos de suelo expuestos en el área de Hualahuises-Linares, dentro de la Región Citrícola de Nuevo León. Para alcanzar tal objetivo se realizó una búsqueda de diferentes perfiles, su muestreo y la caracterización fisicoquímica, mineralógica y geoquímica.

A fin de documentar los resultados obtenidos y su análisis durante el presente estudio se ha elaborado el presente documento de Tesis, el cual incluye: (a) *Introducción*, en donde se presentan generalidades sobre la definición, clasificación e importancia del suelo, así como los tipos que dominan en México y en el área de estudio; (b) *Marco climatológico, geológico y de vegetación* para la Región Citrícola de Nuevo León; (c) *Metodología*, que incluye la descripción del esquema aplicado para efectuar el trabajo de campo, el muestreo y el análisis de las muestras colectadas; (d) *Resultados*, en donde se reporta los datos obtenidos en la actividad de campo y los generados en laboratorio; (e) *Discusión*, en donde se reporta la interpretación de datos y el modelo pedológico para cada perfil y (f) *Conclusiones*, en donde se reportan los principales hallazgos del estudio, sus implicaciones y recomendaciones para trabajo futuro.

1.5 Referencias

- Amundson, R. 2010. 5.01 Soil Formation. Treatise of Geochemistry, Elsevier, 35 p.
- Amundson, R., Berhe, A.A., Hopmans, J.W., Olson, C., Sztein, A.E., Sparks, D.L. 2015. Soil and human security in the 21st Century. *Science* **348**, <https://doi.org/10.1126/science.1261071>.
- Blum, W.E.H., Schad, P., Nortcliff, S. 2018. Essentials of Soil Science: Soil formation, functions, use and classification (World Reference Base, WRB). Borntraeger Science Publishers, Stuttgart, 170 p.

- INEGI 2007.** Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Serie II, escala 1:250000 (Continuo Nacional), México.
- IUSS Working Group WRB 2022.** Base referencial mundial del recurso suelo. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. 4ta. edición, Unión Internacional de las Ciencias del Suelo (IUSS), Viena, 248 p. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://wrb.isric.org/files/WRB_fourth_edition_Spanish.pdf
- Lal, R., Bouma, J., Brevik, E., Dawson, L., Field, D.J., Glaser, B., Hatano, R., Hartemink, A.E., Kosaki, T., Lascelles, B., Monger, C., Muggler, C., Ndzana, G.M., Norra, S., Pan, X., Paradelo, R., Reyes-Sánchez, L.B., Sandén, T., Singh, B.R., Spiegel, H., Yanai, J., Zhang, J. 2021.** Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. *Geoderma Regional* 25, e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>
- López López, A., Pando-Moreno, M. 2014.** Región Citrícola de Nuevo León: Su complejidad territorial en el marco global. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 382 p.
- Mirsal, I.A. 2004.** Soil Classification and Soil Types. En: Mirsal, I.A. (Ed.), Soil Pollution. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05400-0_4
- ONU, 2018.** Objetivos de Desarrollo Sostenible. Página Web: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Ortiz Solorio, C.A. 2015.** Edafología. La ciencia del suelo, clasificación, métodos de estudio. Trillas, Ciudad de México, 400 p.
- Pantoja-Zavala, G.M., Servín-Herrera, B.A. 2022.** Productores citrícolas del estado de Nuevo León, características, problemas y alternativas. *Intersticios Sociales* 24, 365-392.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerin, M., Poch Claret, R.M. 2014** Edafología: Uso y protección de suelos. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 624 p.

2. MARCO FISIOGRAFICO

2.1 Ubicación del área de estudio

Durante el presente estudio se ha efectuado el levantamiento y caracterización de perfiles de suelo ubicados en cuatro dentro de Linares, N.L. en la Región Citrícola ([Ledesma-Ruiz et al., 2015](#); [Figura 2.1](#)): (a) La Gorgonia: 14R0418142 / 2754906, (b) La Nutria: 14R0423723 / 2755225, (c) El Poblado: 14R0424201 / 2754370 y (d) Las Raíces: 14R0434863 / 2747240).

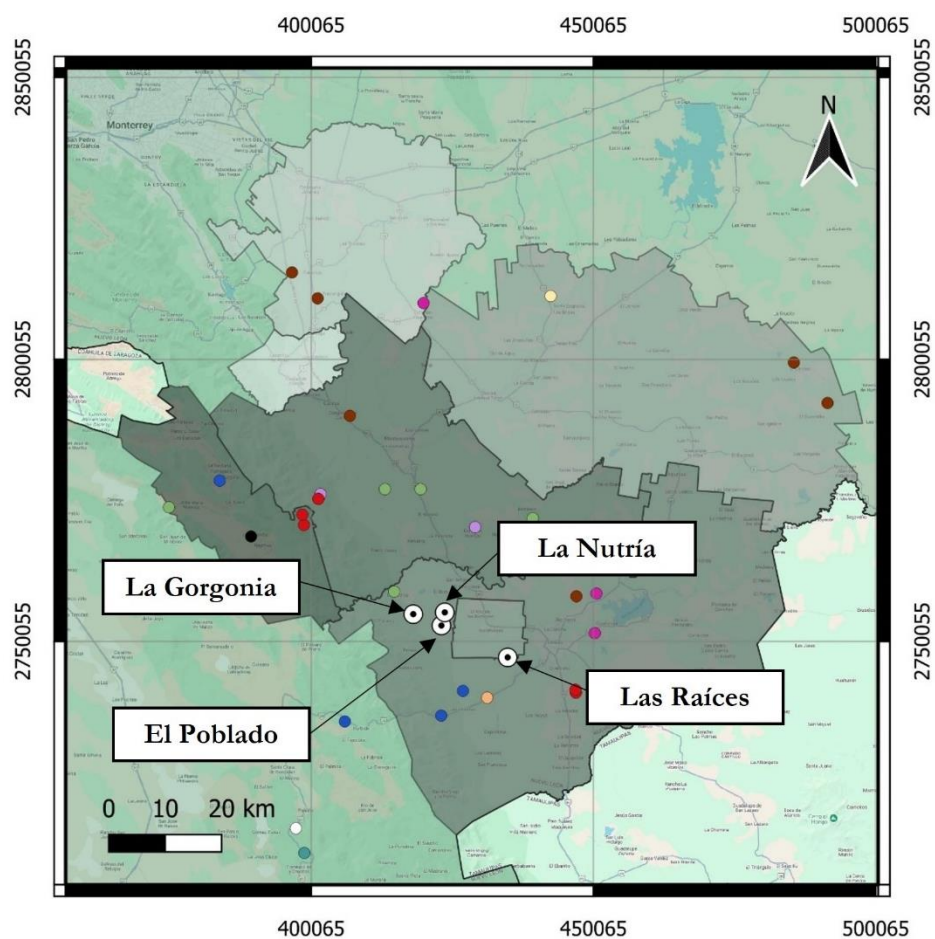


Figura 2.1: Mapa de ubicación del área de estudio dentro de la Región Citrícola de Nuevo León ([Ledesma-Ruiz et al., 2015](#)). Este incluye las localidades donde se han levantado perfiles de suelo: (a) La Gorgonia: 14R0418142 / 2754906, (b) La Nutria: 14R0423723 / 2755225, (c) El Poblado: 14R0424201 / 2754370 y (d) Las Raíces: 14R0434863 / 2747240.

2.2 Geología

La Región Citrícola de Nuevo León se distribuye entre dos provincias fisiográficas ([Figura 2.2; \(Montalvo-Arrieta *et al.*, 2011\)](#)): (a) el flanco E de la Sierra Madre Oriental, estructura orogénica que puede mostrar altitudes máximas de 3700 msnm y (b) la Llanura Costera del Golfo Norte, que se caracteriza por lomeríos con pendientes suave y planicies de gran extensión, con una altitud que promedia ~500 msnm. Cabe señalar que el muestreo efectuado en este trabajo consideró el levantar perfiles de suelo a diferentes altitudes que representan la transición entre estas dos fisiografías.

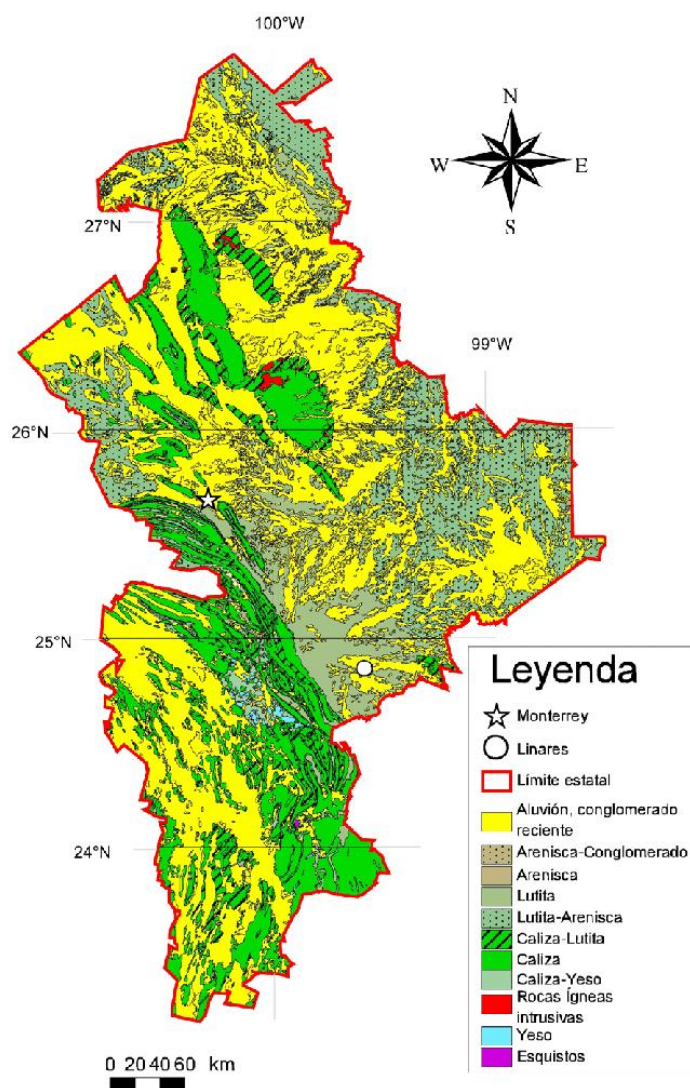


Figura 2.2: Mapa geológico generalizado para Nuevo León ([Montalvo-Arrieta *et al.*, 2011](#)). La Región Citrícola se caracteriza por mostrar litologías asociadas al flanco E de la Sierra Madre Oriental y a los depósitos del Paleógeno al Reciente de la Llanura Costera del Golfo Norte.

2.2.1 Sierra Madre Oriental (SMO)

Es la estructura geológica y topográfica más destacada en la región NE de México, con zona montañosa que alcanza ~3700 msnm. Se considera un cinturón de rocas sedimentarias del Jurásico medio al Cretácico Superior que fue plegado y cabalgado por un evento orogénico entre el Cretácico Superior y el Eoceno ([Goldhammer, 1999](#)). Esta secuencia sedimentaria descansa sobre rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico y el Neoproterozoico ([Alemán-Gallardo et al., 2019](#)).

El basamento del NE de México se encuentra conformado por: (a) *Complejo Novillo*, que consiste principalmente de gneises en facies de granulita, que ocurren en el Anticlinorio Huizachal-Peregrina, con probable relación al bloque Oaxaquia (1.0-1.2 Ga; [Cameron et al., 2004](#)); (b) *Esquisto Granjeno* (~351-300 Ma; [Nance et al., 2007](#)), constituido por cuerpos metavolcánicos y metasedimentarios esquistosos, filitas y cuarcitas en facies de esquistos verdes, además de serpentinitas y metagabros, con exposiciones en el Anticlinorio Huizachal-Peregrina, Miquihuana, Bustamante y Aramberri; (c) *Tonalita Peregrina*, un intrusivo de composición granítica que cortó al Complejo Novillo, con una edad de cristalización (U-Pb en circón) de 448.0 ± 2.9 Ma (Ordovícico; [Alemán-Gallardo et al., 2019](#)); (d) *Grupo Tamatán*, una secuencia de clastos lítico-cuarzo-feldespática, depositada en ambientes marinos someros a profundos entre el Silúrico y el Pérmico ([Casas-Peña et al., 2021](#)); (e) *Formaciones Huizachal, La Boca y La Joya*, conformada por litologías siliciclásticas (incluyendo lechos rojos) y volcánicas, así como conglomerados del Triásico superior al Jurásico ([Goldhammer, 1999](#)).

Bajo condiciones de margen pasivo y de transgresión-regresión, ~3000 m de sedimentos (evaporitas, carbonatos y clásticos) del Jurásico Medio y el Cretácico Superior fueron depositados bajo este basamento ([Figura 2.3; Jenchen, 2007](#)). La base de la secuencia incluye ~1000 m de yeso intercalado con carbonatos del Calloviano-Oxfordiano (Formación Minas Viejas). Carbonatos de ambiente somero (Formación Zuloaga) del Oxfordiano Superior sobreyacen a los cuerpos de sal. Una condición transgresiva dio como resultado el depósito de clásticos finos y margas durante el Kimmerigiano-Tithoniano, en ocasiones con acumulación de materia orgánica (Formación La Casita).

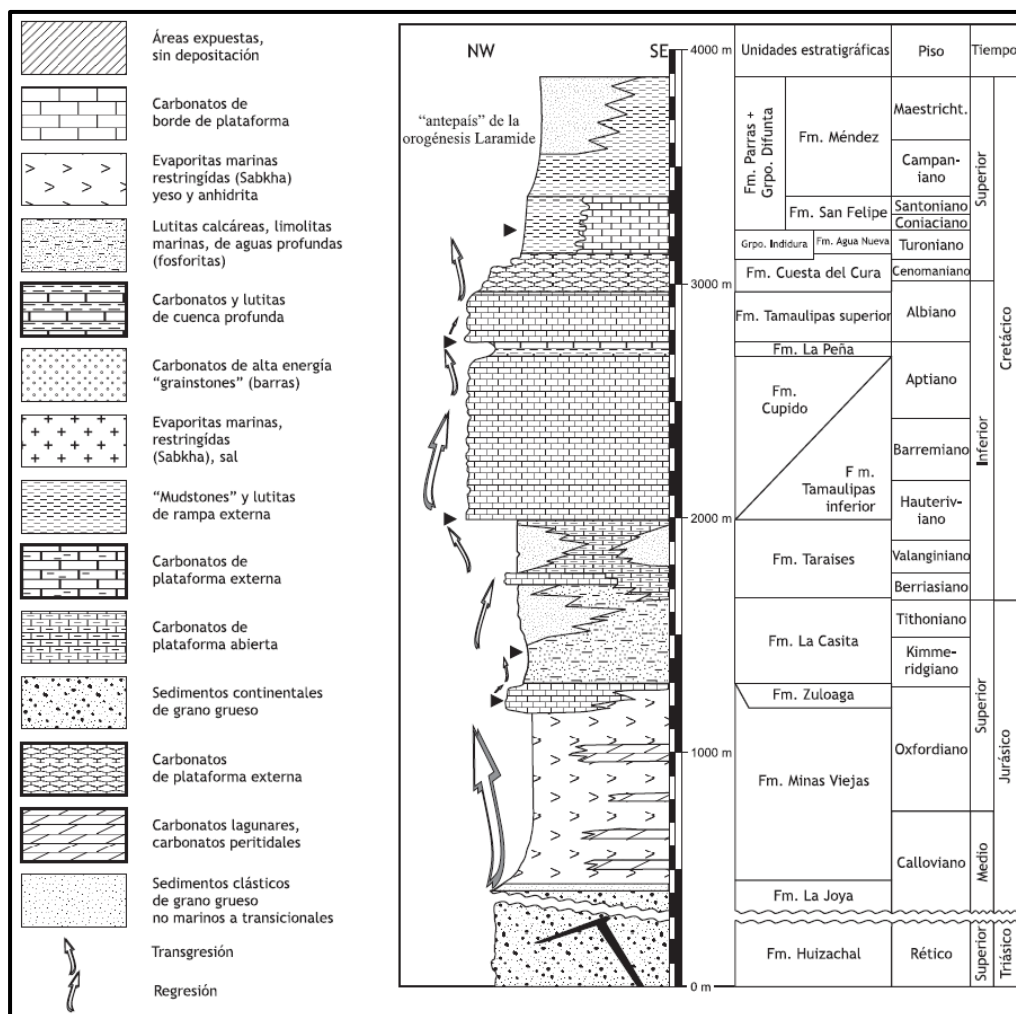


Figura 2.3: Columna estratigráfica general para la Sierra Madre Oriental (Jenchen, 2007).

El depósito evolucionó hacia una acumulación de margas y areniscas (Formación Tarieses) durante el Berriasiano-Valanginiano. A partir de este momento, los ~1000 m superiores de la secuencia están representados por carbonatos masivos a medianos acompañados de lutita (Hauteriviano al Turoniano; Formaciones Cupido/Tamaulipas Inferior, La Peña, Tamaulipas Superior, Cuesta del Cura y Agua Nueva). El sistema de forma paulatina se modificó hacia intercalaciones de margas y lutita, con presencia de volcanoclastos (Coniaciano-Maastrichtiano; Formaciones San Felipe y Méndez).

Un evento orogénico, denominado Orogenia Laramide Mexicana, provocó el plegamiento y cabalgamiento de la secuencia sedimentaria entre el Cretácico Superior y el Paleógeno. La subducción de la placa de Farallón y/o la acreción del terreno Guerrero en el margen Pacífico mexicano (Goldhammer, 1999) se han relacionado como causa del evento compresivo. Sin embargo, el efecto de la deformación disminuyó de forma paulatina en dirección hacia el NE de México.

2.2.2 Cuaternario

La geología pre-cuaternaria del NE de México ha sido un tema de discusión desde inicios del siglo XX. Sin embargo, la información sobre el periodo Cuaternario es muy limitada. Gran parte de la denominada Llanura Costera del Golfo está constituida por terrazas fluviales que se originaron a partir de las desembocaduras de los cañones de la Sierra Madre Oriental, con arroyos tributarios de grava provenientes de la Sierra de San Carlos (Figura 2.4). La más reciente documentación sobre el tema la propusieron Ruiz Martínez y Werner (1997), quienes abordaron a través de cartografía y descripción de los sistemas de terrazas aluviales la conexión entre la sedimentación del Cuaternario y las variaciones climáticas. Los valles vecinos a la Sierra Madre Oriental muestran exposiciones de sedimentos fluviales y lacustres del Plioceno al Reciente. Los sedimentos fluviales desarrollaron, al menos, cinco tipos de terraza sobre el nivel de los ríos. Su crecimiento se ha asociado a cambios rítmicos inducidos climáticamente por acumulación-erosión durante el evento orogénico. Estos ciclos corresponderían a variaciones globales del clima Cuaternario.

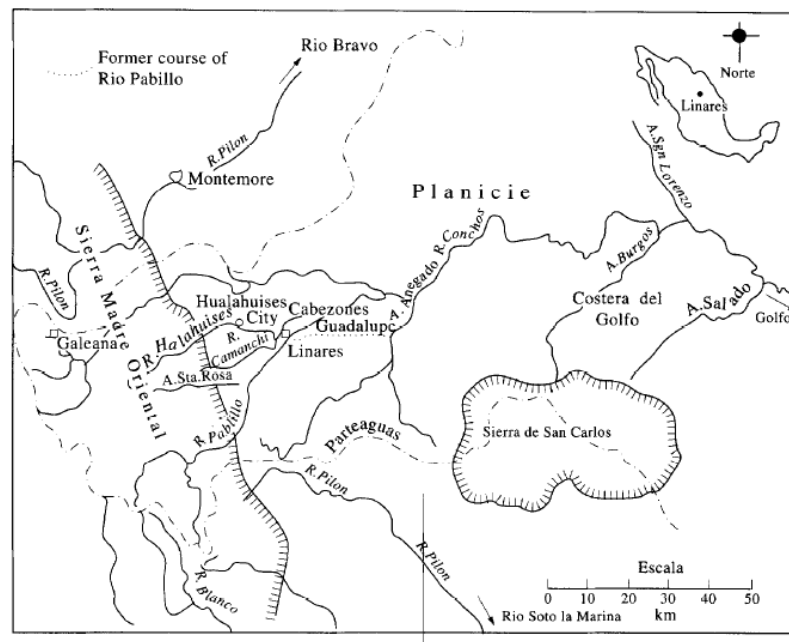


Figura 2.4: Esquema general del área de Linares-Hualahuises, que incluye las principales zonas de aporte de sedimentos, la Sierra Madre Oriental y la Sierra de San Carlos, así como los elementos que conforman el sistema de drenaje (Ruiz-Martínez y Werner, 1997).

Por otra parte, se ha reportado que en el área de Linares existe una diversidad de tipos de suelo (Figura 2.5; INEGI, 1981; Durán Saldaña, 2015). En las zonas aledañas a la Sierra Madre Oriental aparecen *litosoles*, muy delgados, pedregosos y con escasa materia orgánica, y *regosoles*,

que se caracterizan por ser poco desarrollados, con una capa de material original suelto que sobreyace a la roca dura y con muy limitada materia orgánica. De acuerdo con Durán Saldaña (2015), la granulometría de los *litosoles* y *regosoles* en esta zona muestra >35% de arena y <30% de arcillas (Figura 2.6). En planicies y lomeríos dominan los *vertisoles*, que se caracterizan por mostrar un alto contenido de arcillas (35 - 75%; Figura 2.6; Durán Saldaña, 2015), un horizonte A desarrollado y la ausencia del horizonte B. La diversidad de suelos en la región se complementa con ejemplos de *fluvisol*, *feozem*, *xerosol* y *redzina*.

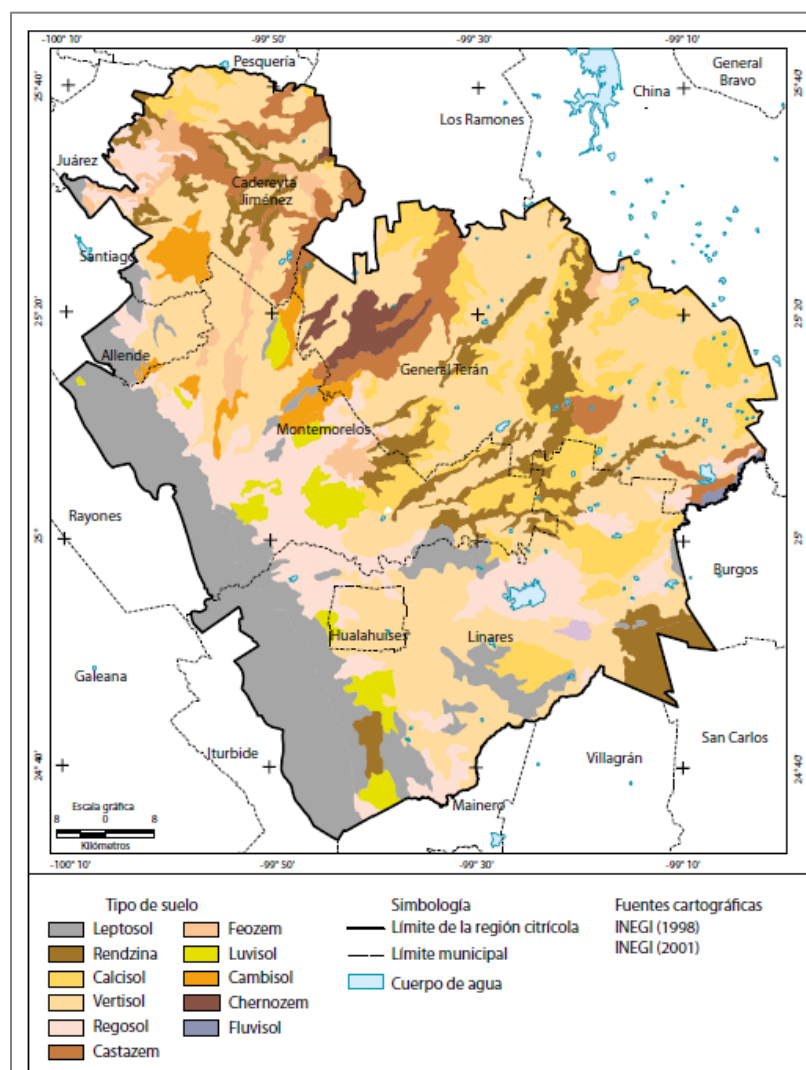
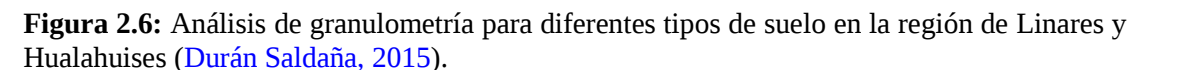


Figura 2.5: Distribución espacial de tipos de suelo en la Región Citrícola de Nuevo León (Pando Moreno y López López, 2014).



En la Región Citrícola domina un clima cálido, sub-húmedo a húmedo (A[C] de acuerdo con la clasificación de Köppen; [García, 1973](#)). Su temperatura anual promedio es de 22°C, con valores extremos de -10°C en invierno y de 45°C en verano ([Ledesma-Ruiz *et al.*, 2015](#)). En general, la precipitación se produce por ingreso de masas de aire caliente húmedo desde el Golfo de México, dando lugar a precipitación en los flancos de la sierra (1100 mm/año) y de 350 a 750 mm/año en la planicie. Periodos de lluvia intensa se dan durante mayo y entre agosto y septiembre (77% del total). El periodo de seca va de noviembre a marzo (~3%/mes).

estudio la temperatura anual promedio es de 22°C, con un valor máximo promedio de 28.7°C y uno mínimo promedio de 15.3°C (Figura 2.7). El periodo más cálido va de mayo a agosto (rebasando los 35°C en promedio) y el más frío ocurre entre diciembre y febrero (alcanzando los 5°C en promedio). La precipitación ocurre en promedio durante 58.4 días, con un acumulado anual promedio de 744.8 mm (Figura 2.8). Una alta evaporación promedio (hasta ~1645 mm) caracteriza a la región, lo que genera un desbalance hídrico.

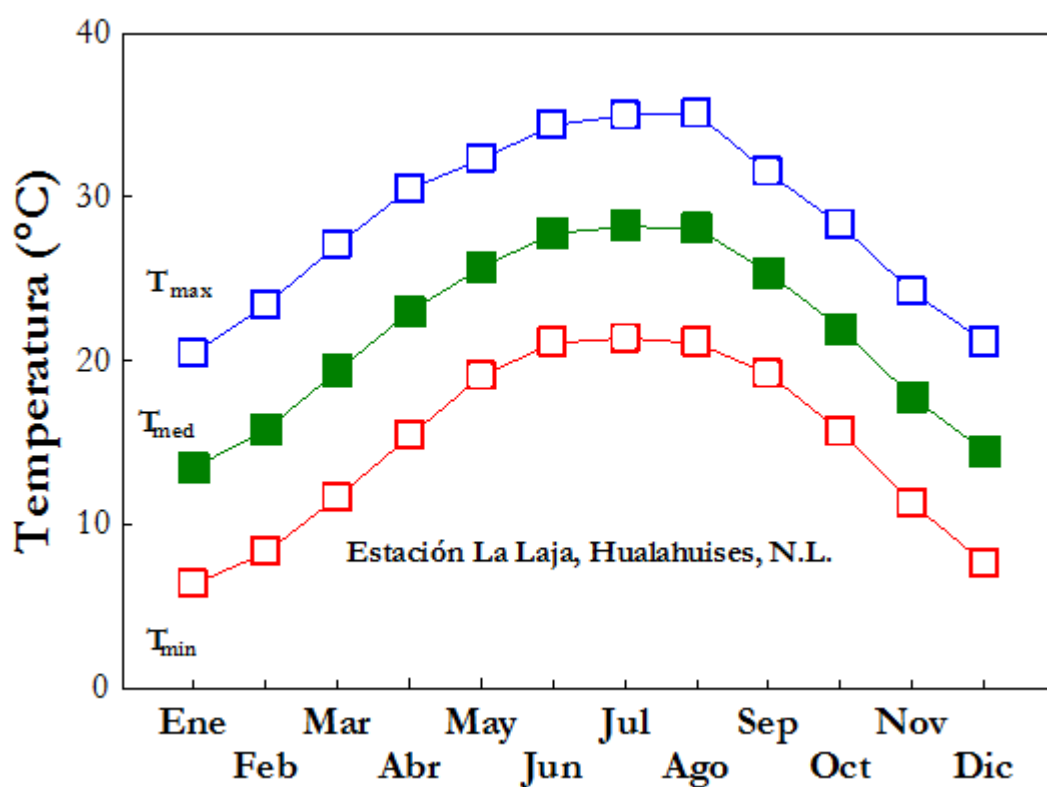


Figura 2.7: Variación de la temperatura media, máxima y mínima en la estación climatológica La Laja, Hualahuises, N.L. (1979 – 2024).

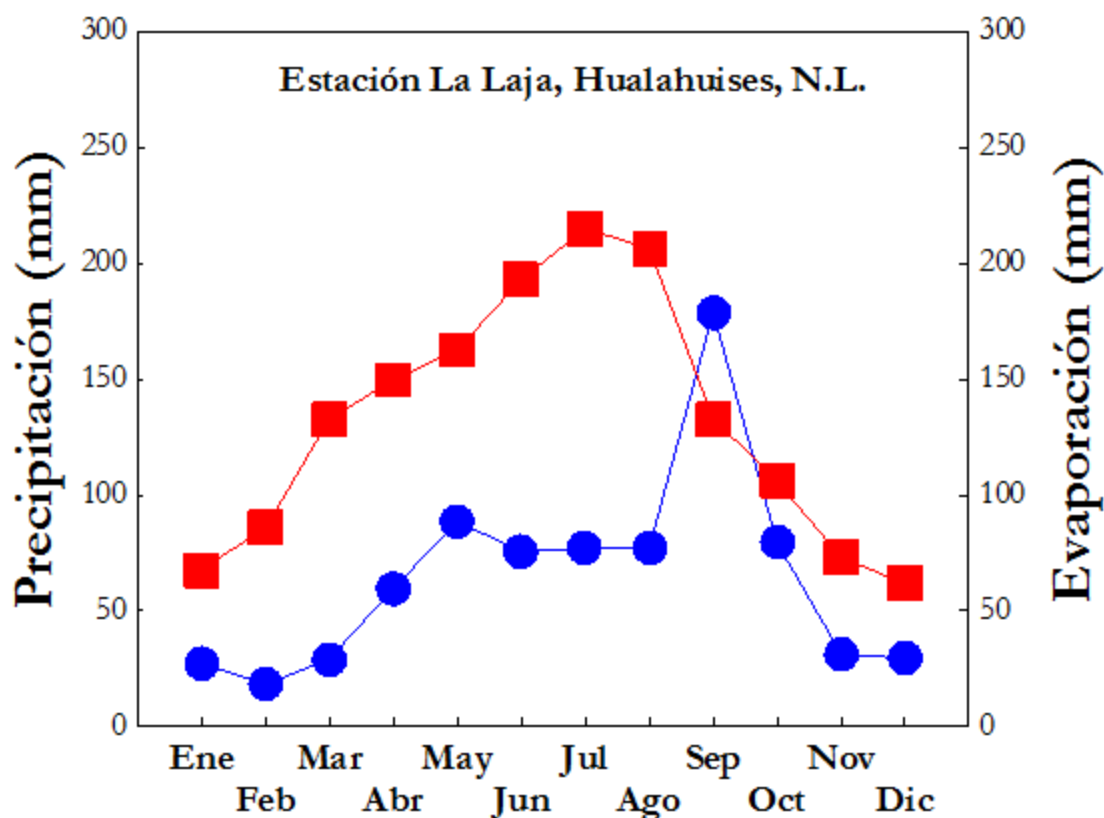


Figura 2.8: Variación de la precipitación (mm) y evaporación (mm) en la estación climatológica La Laja, Hualahuises, N.L. (1979 – 2024).

2.4 Vegetación

Para Nuevo León se ha reportado 3175 especies de plantas que se distribuyen en 13 comunidades principales (INEGI, 1986; Villarreal y Estrada, 2008). De forma particular, en la Región Citrícola se presentan tres de estas:

- (a) *Matorral tamaulipeco*: Representado por especies arbustivas bajas, con una distribución que se concentra entre los 200 y 450 m de altitud. Está conformado por especies inermes y espinosas con alturas de 1-2 m (Muller, 1939; Rojas, 1965; Rzedowski, 1978)
- (b) *Matorral submontano*: Ocupa una superficie de $\sim 5000 \text{ km}^2$ ($\sim 8\%$ del territorio del estado de Nuevo León) y presenta su máxima distribución entre los 600 y 800 m de altitud. Está constituido por elementos inermes y espinosos, con alturas entre dos y cuatro metros (White, 1940; Muller, 1939; Johnston, 1963; Miranda y Hernández, 1963; Rojas, 1965; Rzedowski, 1978).

- (c) *Mezquital*: Incluye comunidades dominadas por *Prosopis glandulosa* var. *torreyana* y *P. glandulosa* var. *Glandulosa* que se distribuyen de manera irregular, ocupando zonas que han sido perturbadas por cultivo y después abandonadas (Rojas, 1965).

El matorral submontano domina en los límites entre la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo. Este se caracteriza por especies arbustivas altas y árboles de porte bajo que incluyen *Citharexylum berlandieri*, *Diospyros palmeri* y *Gochnatia hypoleuca*. En zonas cercanas a ríos y arroyos se desarrolla vegetación de ribera, que incluye a *Arundo donax*, *Bacharis salicifolia*, *Decatropis bicolor*, *Taxodium muconatum*, *Populus alba*, *Salix nigra* y *Platanus occidentalis*.

Al nivel de la Sierra Madre Oriental aparecen bosques mixtos, constituidos por árboles de hoja perenne (pino) y de hojas caducifolias (encino). Algunas de las especies incluyen a *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote*, *Quercus polymorpha*, *Quercus pungens* y *Quercus rysophilla*.

2.5 Referencias

- Alemán-Gallardo, E.A., Ramírez-Fernández, J.A., Weber, B., Velasco-Tapia, F., Casas-Peña, J.M. 2019.** Novillo Metamorphic Complex, Huizachal-Peregrina Anticlinorium, Tamaulipas, Mexico: Characterization and development based on whole-rock geochemistry and Nd-isotopic ratios. *Journal of South American Earth Sciences* **96**, Article 102382, 17 p.
- Cameron, K. L., Lopez, R., Ortega-Gutiérrez, F., Solari, L. A., Keppie, J. D., Schulze, C. 2004.** U-Pb geochronology and Pb isotopic compositions of leached feldspars: Constraints on the origin and evolution of Grenville rocks from eastern and southern Mexico. *Geological Society of America Memoirs* **197**, 755-769.
- Casas-Peña, J.M., Ramírez-Fernández, J.A., Velasco-Tapia, F., Alemán-Gallardo, E.A., Augustsson, C., Weber, B., Frei, D., Jenchen, U. 2021.** Provenance and tectonic setting of the Paleozoic Tamatán Group, NE Mexico: Implications for the closure of the Rheic Ocean. *Gondwana Research* **91**, 205-230.
- Durán Saldaña, E. 2015.** Análisis del potencial de infiltración en suelos de la región de Linares-Hualahuises, Nuevo León. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, 150 p.
- García, E. 1973.** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 3a. Edición, Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F., 252 p.

- Goldhammer, R.K. 1999.** Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico. En: Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F. (eds.), Mesozoic sedimentary and tectonic history of north-central Mexico. *Geological Society of America Special Paper* **340**, 1-58.
- INEGI 1981.** Síntesis geográfica del Estado de Nuevo León. México, D.F., p. 170-190.
- Jenchen, U., 2007.** La Popa Basin, NE Mexico: an analog for near salt deformation and hydrocarbon trapping. *GuideBook*, Force Norway-Field trip to the La Popa Basin (October 24-28, 2007), 60 p.
- Ledesma-Ruiz, R., Pastén-Zapata, E., Parra, R., Harter, T., Mahlknecht, J. 2015.** Investigation of the geochemical evolution of groundwater under agricultural land: A case study in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology* **521**, 410-423.
- López López, A., Pando-Moreno, M. 2014.** Región Citrícola de Nuevo León: Su complejidad territorial en el marco global. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 382 p.
- Nance, R.D., Fernández-Suárez, J., Keppie, J.D., Storey, C., Jeffries, T.E. 2007.** Provenance of the Granjeno Schist, Ciudad Victoria, México: Detrital zircon U-Pb age constraints and implications for the Paleozoic paleogeography of the Rheic Ocean. *Geological Society of America Special Paper* **423**, 453-464.
- Ruiz Martínez, M.A., Werner, J. 1997.** Research into the Quaternary sediments and climatic variations in NE Mexico. *Quaternary International* **43-44**, 145-151.
- Sauceda-Quezada, E. 2011.** Estudio etnobotánico de especies arbustivas y arbóreas en los municipios de Linares y Hualahuises, Nuevo León, México. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Forestales, UANL, 141 p.

3. METODOLOGÍA

3.1 Plan general de trabajo

A fin de alcanzar el objetivo planteado, se siguieron las recomendaciones del INEGI (2009) para la desarrollo de cartas edafológicas (Figura 3.1). En los siguientes apartados se describen los procesos efectuados en cada una de estas etapas. Es importante señalar que el Marco climático, fisiográfico y forestal se presentó en el capítulo anterior.

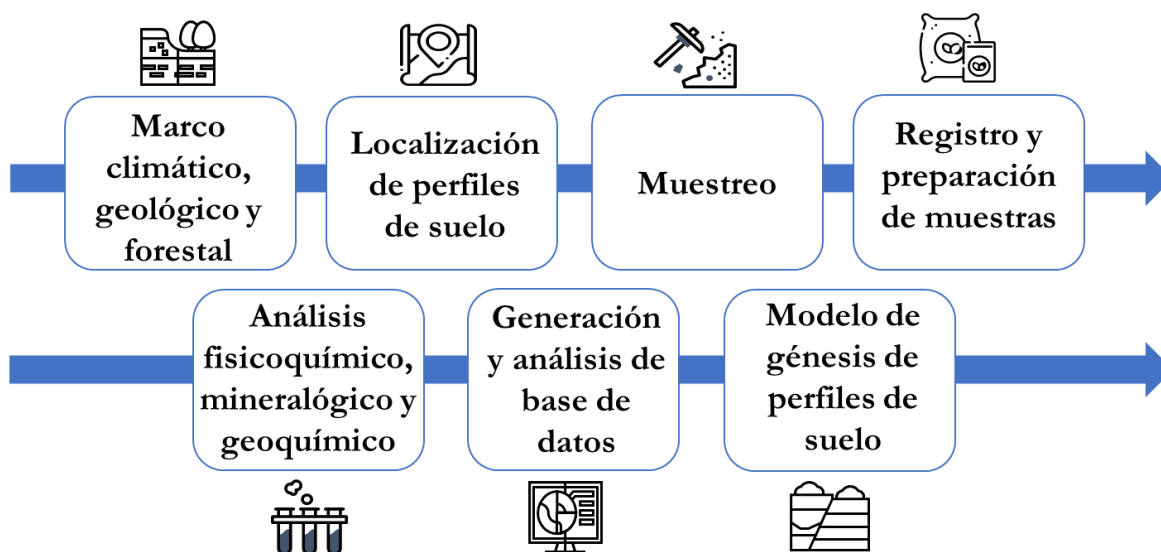


Figura 3.1: Esquema metodológico para estudio de perfiles de suelo en el área de Linares.

3.2 Localización y muestreo en perfiles de suelo

Se realizaron recorridos en el área de estudio (región Hualahuises – Linares; Figura 3.2) y se realizó el levantamiento de cuatro perfiles de suelo, considerando un descenso en la altitud: (a) La Gorgonia (14R0418142 / 2754906, altitud = 587 msnm), (b) El Poblado (14R0422650 / 2752954, altitud = 541 msnm), (c) La Nutria (14R0423723 / 2455225, altitud = 520 msnm) (y (d) Las Raíces (14R0434863 / 2747240, altitud = 406 msnm).

En cada una de estas localidades se determinó la longitud y altura del perfil, así como los rasgos que diferencian a la roca madre y a los horizontes (litología, textura y dimensión) que conforman su estructura. Se efectuó un registro fotográfico en cada uno de ellos. De acuerdo con la información recabada, se realizó su clasificación de acuerdo con el esquema propuesto por la FAO-UNESCO.

Se realizó la colecta (~3 kg) y registro de cada uno de los horizontes con el propósito de efectuar su análisis fisicoquímico, mineralógico y geoquímico. Las muestras de roca pasaron por un proceso de descostrado, fragmentación y pulverizado a una malla de 200 (0.074 mm). Las muestras de horizontes tipo C a A y los de tipo O fueron secados a la intemperie y temperatura ambiente. Más adelante fueron pulverizados y tamizados a malla 10 (2 mm) como preparación al análisis fisicoquímico (~1.5 kg). Otra porción de la muestra original (~0.5 kg) fue tamizada a malla 200 (0.074 mm) para los estudios de mineralogía y geoquímica.

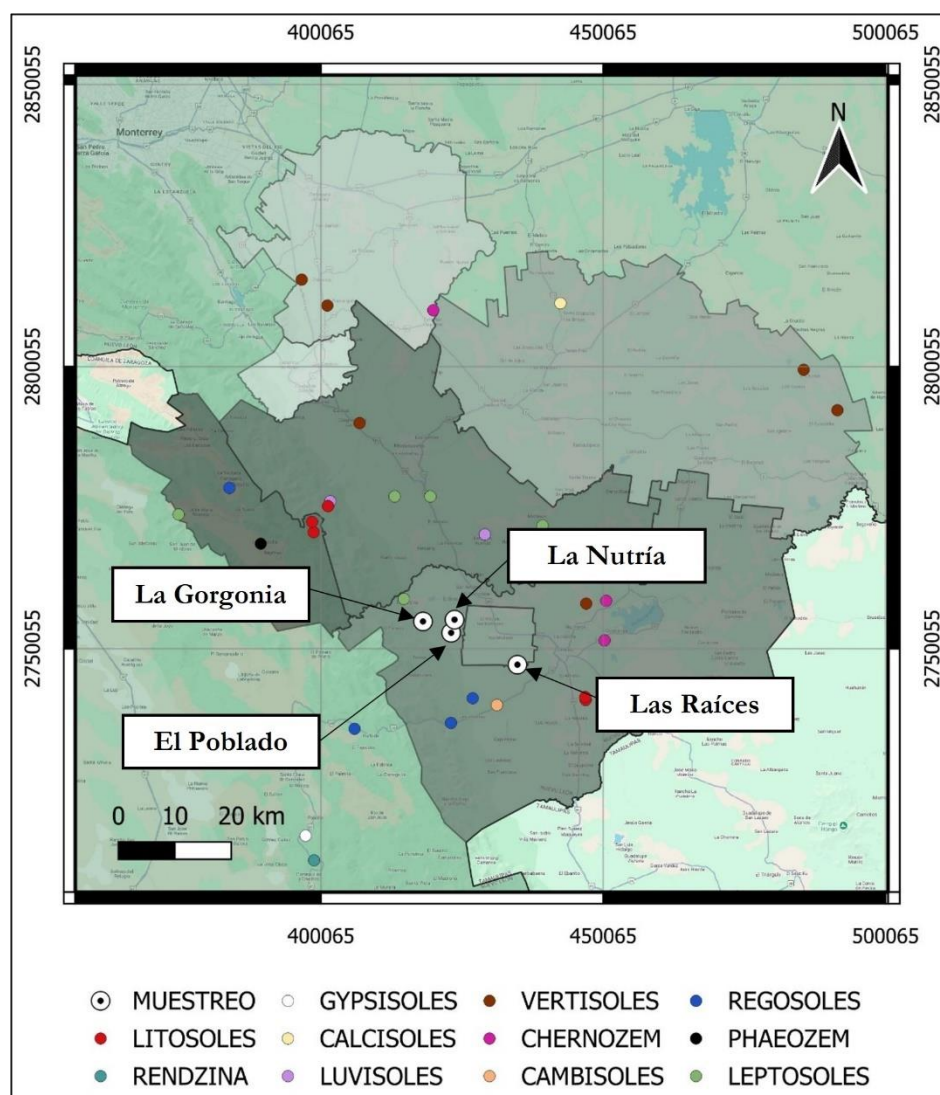


Figura 3.2: Localización de los sitios de muestreo de perfiles de suelo en el área de Linares, dentro de la Región Citrícola de Nuevo León. Adicionalmente, se incluye la ubicación de perfiles de suelo reportados por [INEGI \(2025\)](#).

3.3 Análisis fisicoquímico

En el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL se aplicaron métodos clásicos a las muestras bajo estudio (Woerner, 1991; INEGI, 2009): pH, conductividad eléctrica, color, textura, contenido de materia orgánica y carbonatos.

3.3.1 Análisis de textura

A través del método de Bouyoucos, se determinó la relación porcentual entre arena, limo y arcilla, a fin de clasificar cada horizonte (Siebe *et al.*, 1996; Rodríguez y Rodríguez, 2002). El análisis se desarrolla por asentamiento diferencial de las partículas en agua (Figura 3.3). Las muestras de tipo arenoso se sedimentan rápidamente, mientras que las de tamaño de arcilla (con mayor área superficial por unidad de volumen) sedimentan más lentamente. Este comportamiento lo explica la Ley de Stokes, que indica que la velocidad de sedimentación de las partículas es directamente proporcional al cuadrado del radio de grano, considerado idealmente una esfera (Porta *et al.*, 2011). De acuerdo con las indicaciones de la USDA (*United States Department of Agriculture*), la clase textural de una muestra dependerá del porcentaje de sus componentes.



Figura 3.3: Determinación de textura de suelos utilizando el método de Bouyoucos (Porta *et al.*, 2011).

3.3.2 Análisis de color

Este atributo físico es el resultado de la influencia de diversos factores: la roca madre, el intemperismo, el contenido de materia orgánica, el drenaje y la aireación (Castellanos *et al.*, 2000; Honorato, 2000). Para su descripción se utiliza el esquema de Munsell, que considera el matiz, el brillo y la croma del material (Porta *et al.*, 2011; Figura 3.4).

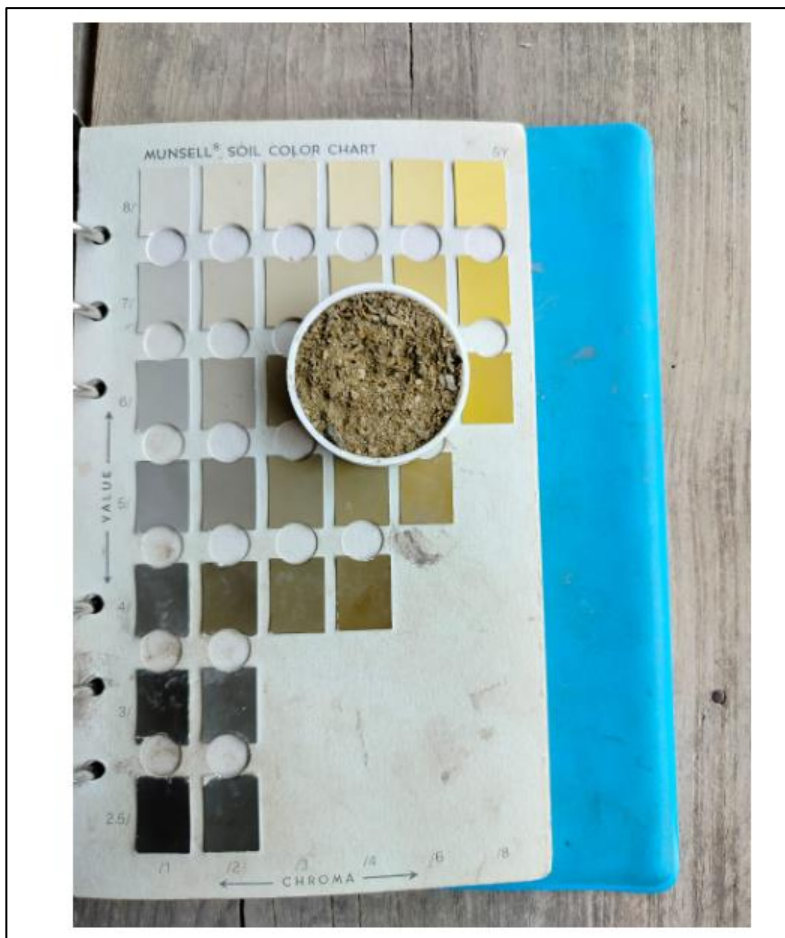


Figura 3.4: Determinación de color de muestra de suelo (en condiciones secas y en húmedas) utilizando el esquema de Munsell (Porta *et al.*, 2011).

3.3.3 pH

Representa al logaritmo negativo base diez de la actividad de iones hidrógeno libres ($\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$). Esta variable condiciona las reacciones químicas potenciales del suelo (Castellanos *et al.*, 2000). El cálculo se realiza en una mezcla de 10 g de muestra con 20 ml de CaCl_2 0.01 M, utilizando

un medidor *Corning Pinnacle 542 pH/Conductivimeter* (Figura 3.5). El instrumento fue estandarizado con ayuda de soluciones buffer de pH 4.01, 7.00 y 10.01 que se evaluaron por duplicado.

De esta forma, los horizontes pueden clasificarse como fuertemente alcalinos (> 8.6), medianamente alcalinos ($7.4 - 8.5$), neutros ($6.6 - 7.3$), moderadamente ácidos ($5.1 - 7.2$) o fuertemente ácidos (< 5.0). De acuerdo con la norma NOM-021-RECNAT-2000, esta determinación es importante especialmente para suelos de climas áridos y semi-áridos.

3.3.4 Análisis de conductividad eléctrica

La determinación de la salinidad del suelo es de particular importancia para fines agrícolas. El análisis se efectúa en mezclas agua:suelo 1:5 (Honorato, 2000). En el caso presente, se utilizó un equipo *Corning Pinnacle 542 pH / Conductivimeter* (Figura 3.5), el cual fue calibrado utilizando soluciones estándar de KCl 0.1 M ($12,880 \mu\text{S cm}^{-1}$) y 0.01 M ($1,413 \mu\text{S cm}^{-1}$).

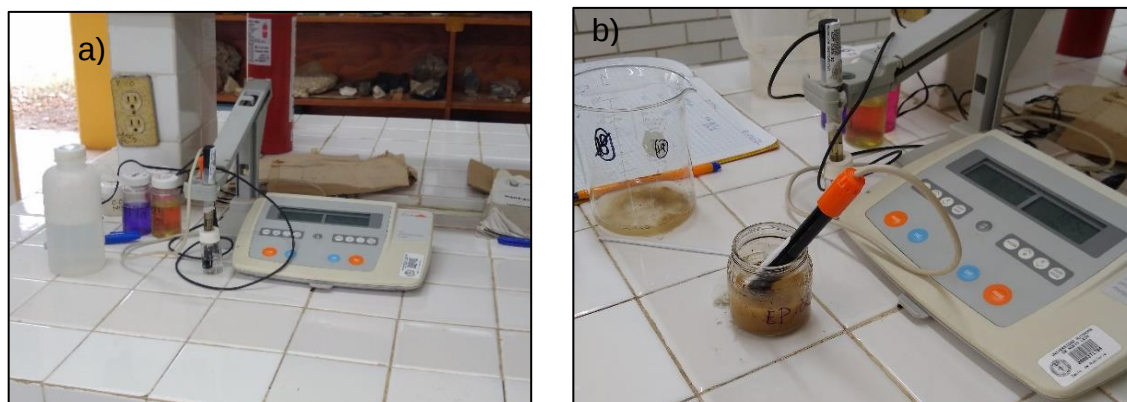


Figura 3.5: Equipo de medición de pH y conductividad eléctrica en muestras de suelo mezcladas con una solución de CaCl_2 0.01 M.

3.3.5 Análisis de contenido de materia orgánica

Aunque su definición es tema de debate, se considera materia orgánica o *humus* a los materiales de origen vegetal o de microorganismos incluidos en los horizontes de suelo. Este componente influye en las propiedades físicas y químicas del suelo (Navarro-Pedreño *et al.*, 1995). Ya que esta fracción se caracteriza por propiedades quelatantes, su contenido está ligado a la presencia de nitrógeno, azufre y fósforo, así como a la disponibilidad de fierro, magnesio, cobre y zinc (Castellanos *et al.*, 2000).

En este trabajo se aplicó la metodología modificada de [Walkley y Black \(1934\)](#), la cual considera la oxidación incompleta de 0.5 g de muestra con una mezcla de $K_2Cr_2O_7$ - H_2SO_4 (25 ml:25 ml; [Figura 3.6](#)) y la titulación posterior con una solución de $FeSO_4$ 0.4 N, utilizando ferroína como indicador de óxido-reducción. [Woerner \(1991\)](#) reportó una tabla de contenidos de carbono orgánico en función de la textura.



Figura 3.6: Determinación de contenido de materia orgánica en muestras de suelo por el método de [Walkley y Black \(1934\)](#).

3.3.6 Análisis elemental de carbono total

El análisis se efectúa con un calcímetro ([Figura 3.7](#)), el cual evalúa el desplazamiento de volumen de CO_2 desprendido desde la muestra (fases de carbonatos $CaCO_3$ y $CaMg[CO_3]_2$) durante su titulación con una solución acuosa de HCl al 10% ([Woerner, 1989](#)).

3.4 Análisis mineralógico

3.4.1 Separación de fracción arcillosa ($< 2 \mu m$)

Se colocaron 50 g de un horizonte de suelo en un vaso de precipitado y se mezclaron con un 1 litro de agua destilada. La mezcla fue agitada por una hora a una velocidad de 700 RPM y se transfirió a una probeta graduada de 1 litro. En este recipiente se dejó reposar por 3 horas y posteriormente se recuperaron los 4 centímetros superiores de mezcla, los cuales fueron transferidos a un vaso de precipitado de 100 ml. Esta alícuota, que incluye la fracción de $< 2 \mu m$ de tamaño de partícula, se dispersó en un vidrio de 5 cm $\times$ 5 cm. Al evaporar, la pasta se dejó secar a temperatura ambiente hasta formar una capa fina de agregado orientado.



Figura 3.7: Equipo calcímetro para determinación de carbono total en muestras de suelo por titulación con HCl.

3.4.2 Análisis de difracción de rayos-X

Se aplicó un método de difracción de rayos-X para identificar el arreglo de minerales en los horizontes de suelo (Cullity y Stock, 2001). El proceso se basa en el análisis de un patrón de picos e intensidades relacionados a haces de rayos-X difractados por los planos hkl de cristales de un mineral al ser bombardeados con un haz monocromático de rayos-X primario. El proceso de difracción sólo ocurre cuando se cumple la ley de Bragg: $n\lambda = 2d\sin\theta$, en donde n = integrador numérico asociado a la repetitividad del fenómeno, λ = longitud de onda del haz de rayos-X primario, d = distancia interplanar del plano hkl , y θ = ángulo de difracción.

Un difractómetro *D8 Advance* (Bruker, Billerica, MA), instalado en el Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, CINVESTAV-IPN Unidad Mérida (Figura 3.8), se utilizó para generar los patrones de polvos. El equipo fue operado a 40 kV y 30 mA para generar una radiación $\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$. El barrido se realizó en un intervalo 2θ de $20-80^\circ$. La identificación se efectuó por comparación con los patrones estándar reportados por el JCPDS (*Joint Committee of Powder*

Diffraction Standards) del ICDD (*International Centre for Diffraction Data*; <http://www.icdd.com/index.php/pdfsearch/>) (Klein y Hulburt, 1999).

De esta forma, se obtuvieron patrones para muestra original y para separados de fracción de arcilla (muestra original, saturada con etilenglicol y calentada a 300°C).

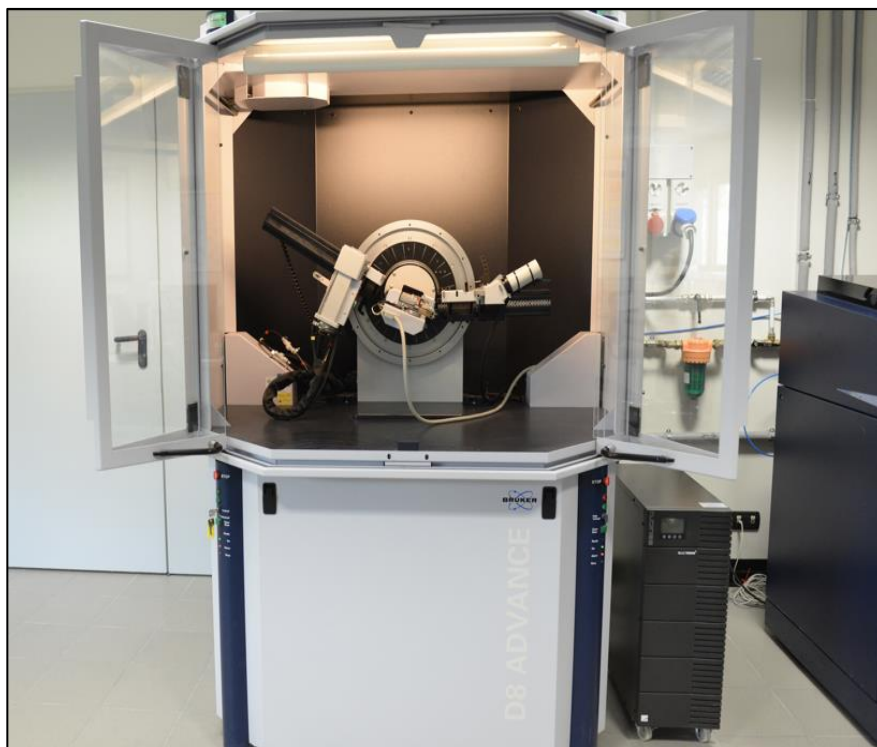


Figura 3.8: Difractómetro *D8 Advance* (Bruker) para identificación de especies minerales en muestras de suelo.

3.5 Análisis geoquímico

La concentración en elementos mayores de 18 muestras de horizontes de suelo se determinó por fluorescencia de rayos-X en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE (Ensenada, B.C.). En este método se genera un haz primario de rayos-X, el cual se utiliza para excitar a los átomos que constituyen la muestra. Cada elemento X produce un haz secundario o fluorescente debido a transición de niveles atómicos n_2 a n_1 . Las señales se caracterizan por una energía individual de acuerdo con la ecuación de Moseley:

$$E_X = RhC(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

en donde E_X es la energía característica del haz de rayos-x del elemento, R es la constante de Rydberg ($1.09737 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$), h es la constante de Planck ($6.6262 \times 10^{-34} \text{ Js}$), C es la velocidad de los fotones, Z es el número atómico y σ es la constante de apantallamiento. La intensidad I_X de la señal E_X es directamente proporcional a la concentración del elemento X en la muestra (Velasco-Tapia y Verma, 1996). La calibración del sistema XRF se efectuó considerando un grupo de materiales de referencia geoquímica.

Por otra parte, la concentración en elementos traza para las 18 muestras se estableció por un método de espectrometría de masas de analizador cuadrupolar acoplado por inducción a plasma (Q-ICP-MS), con un equipo instalado en el Centro de Geociencias, UNAM (Juriquilla, Qro.). El análisis está relacionado a la ionización inicial de los átomos presentes en la muestra. Las especies generadas se transportan y se separan de acuerdo con su relación carga/masa dentro de un sistema de deflexión magnética (Velasco-Tapia y Verma, 1996).

El procedimiento de preparación de muestras y del análisis se encuentra reportado en Mori *et al.* (2009). Inicialmente, las muestras de suelo fueron atacadas con HF concentrado en contenedores de teflón hasta obtener un residuo naranja. Este último fue disuelto con HCl concentrado y diluido con agua ultrapura. La solución resultante fue analizada para sus contenidos de elementos traza en un equipo Q-ICP-MS Thermo ICap Qc (Figura 3.9) con una celda de colisión/reacción para reducir interferencias espectrales. El método fue calibrado utilizando materiales de referencia geoquímica.

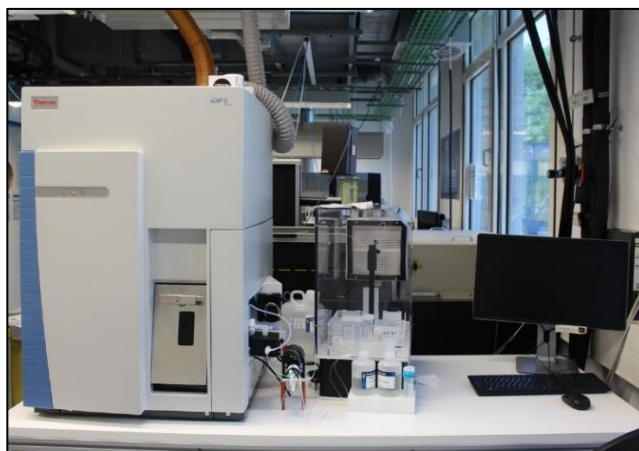


Figura 3.9: Imagen de un sistema Q-ICP-MS Thermo ICap Qc para análisis de elementos traza en muestras de suelo.

3.6 Referencias

- Castellanos, J.Z., Uvalle, J.X., Aguilar, A. 2000.** Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas 2ª Ed. Colección INCAPA, México, 226 p.
- Cullity, B.D., Stock, S.R. 2001.** Elements of X-Ray Diffraction. 3ra. Ed., Prentice-Hall, 396 p.
- Honorato, R. 2000.** Manual de Edafología. 4ª Ed. Editorial Alfa Omega, México. 267 p.
- INEGI, 2009.** Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie IV. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250ks4gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no.
- INEGI, 2025.** Carta edafológica Escala 1:250 000 Serie III G1411 (Tamaulipas, Nuevo León).
- Klein, C., Hulburt, C.S. 1999.** Manual of Mineralogy (after James D. Dana). Wiley, New York, 681 p.
- Navarro-Pedreño, J., Moral, H., Gómez, L., Mataix, B. 1995.** Residuos orgánicos y agricultura. Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones Alicante, España, 108 p.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Poch, R. 2011.** Introducción a la edafología. Uso y protección de suelos, 2ª Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España, 849 p.
- Rodríguez, H., Rodríguez, J. 2002.** Métodos de análisis de suelos y plantas. Criterios de interpretación. Editorial Trillas, UANL, 196 p.
- Siebe, C., Jahn, R., Stahr, K. 1996.** Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo 4ª ed. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Chapingo, Estado de México, 57 p.
- Velasco-Tapia, F., Verma, S.P. 1996.** El análisis químico de materiales geológicos. *Educación Química* 7, 180-184.
- Woerner, M. 1991.** Los suelos bajo vegetación de matorral descritos a través de ejemplos en el Campus Universitario de la UANL, Linares, N.L., *Reporte Científico N°22*. Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, México. 116 p.

4. RESULTADOS

4.1 Perfil La Gorgonia

4.1.1 Descripción del perfil edafológico

Este se ubica en las coordenadas 14R0418142 / 2754906 (altitud 588 msnm), en la comunidad La Gorgonia (Linares, N.L.). De forma general, el perfil se extiende 34 m de longitud y 1.75 m de altura (Figuras 4.1-4.3), con una orientación E-W. Se encuentra constituido por cuatro horizontes de tipo R (GOR-01; espesor = 1.30 m), C (GOR-02; espesor = 0.30 m), A (GOR-03; espesor = 0.10 m) y O (GOR-04; espesor = 0.05 m).

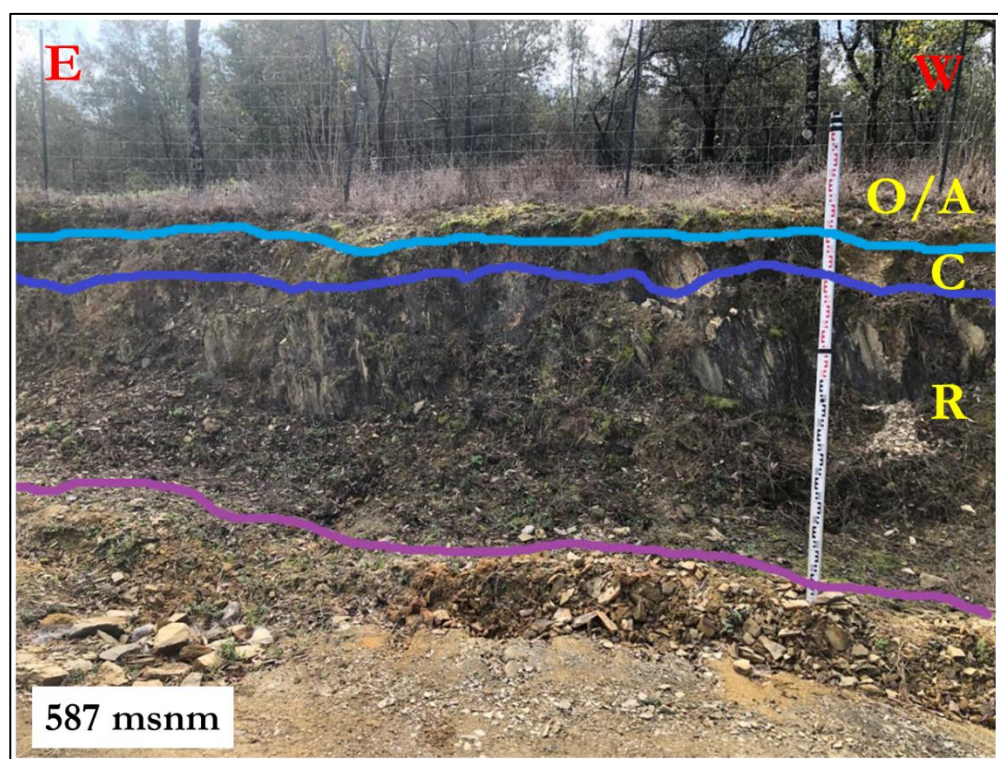


Figura 4.1: Estructura del perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L.

El horizonte R es representado por estratos de 10-30 cm de lutita alterada de la Formación Méndez. El resto de los horizontes se encuentran poco desarrollados, por lo que se puede considerar un suelo en incipiente de desarrollo. El horizonte C está constituido por la roca madre en un mayor estado de degradación, aunque aún se observan restos de la lutita. El horizonte A se conforma de arcilla, que en su parte superior muestra una acumulación limitada de materia orgánica (horizonte O).

Estas características corresponden a un leptosol o litosol, **con** poco desarrollo de estratos A y O (< 15 cm), tal y como reportaron [Cantú Silva y González Rodríguez \(2014\)](#) en la Región Citrícola.



Figura 4.2: Panorámica del perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L.

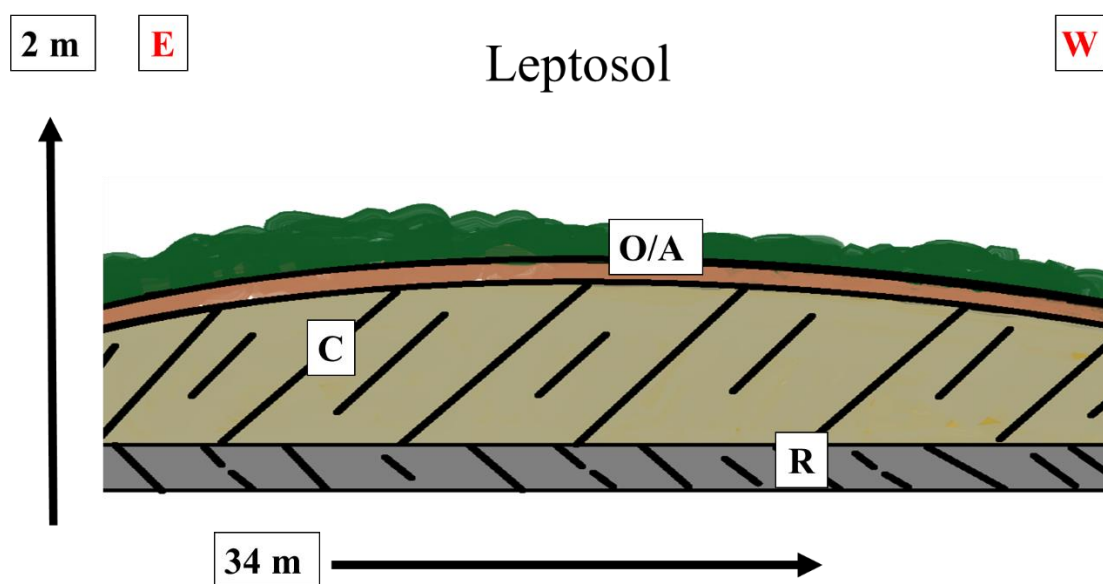


Figura 4.3: Esquema del perfil de suelo La Gorgonia (Linares, N.L.), con la distribución de horizontes y dimensiones.

4.1.2 Parámetros fisicoquímicos, mineralógicos y geoquímicos

El análisis fisicoquímico reveló pH básicos (7.60 – 7.85) con conductividades eléctricas de 69.0 – 102.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 4.1). Las texturas dominantes son la franco-arenosa y la arcillo-limosa. El contenido de carbonatos es relativamente alto a través del perfil (10.0-25.1 %), mientras que la materia orgánica alcanza sólo 1.31% en el horizonte O.

Tabla 4.1: Parámetros fisicoquímicos del perfil La Gorgonia (Linares, N.L.)

Muestra	Horizonte	pH	Cond. Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Materia Orgánica		Textura			Clasificación Agronómica	% Carbonatos	Contenido de Carbonato total
				% C total	% C org	% Arena	% Limo	% Arcilla			
GOR-01	R	7.85	101.4								
GOR-02	C	7.76	69.0	0.63	0.34	65.16	20.36	14.48	Franco arenosa	10.40	Abundante
GOR-03	A	7.66	102.2	1.37	0.74	9.52	48.00	42.48	Arcillo limoso	20.00	Abundante
GOR-04	O	7.60	102.5	1.31	0.71	7.52	46.00	46.48	Arcillo limoso	25.10	Muy abundante

En la Figura 4.4 se presentan los patrones de difracción de rayos-X de los horizontes del perfil La Gorgonia. Las muestras se encuentran constituidas por las siguientes fases minerales: (a) cuarzo, SiO_2 , (b) calcita, CaCO_3 , (c) montmorillonita, $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, (d) illita 2M1, $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$, (e) rectorita, $\text{K}_{1.2}\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, (f) anatasa, TiO_2 y (g) albita, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$.

Por otra parte, se realizó el análisis de elementos mayores (% peso) y traza (ppm) en los horizontes bajo estudio (Tabla 4.2). Las muestras se caracterizan por mostrar concentraciones dominantes de $\text{SiO}_2 = 35.5 - 45.4\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.2 - 14.5\%$, $\text{CaO} = 14.8 - 22.7\%$, $\text{K}_2\text{O} = 1.7 - 2.5\%$. La presencia de estos elementos se correlaciona con el arreglo mineral de cuarzo, calcita, albita y minerales arcillosos. El contenido de materia orgánica es $< 2.4\%$.

Por otra parte, los horizontes muestran concentraciones en elementos litófilos relativamente altas ($\text{Ba} = 256\text{-}345$ ppm, $\text{Sr} = 326\text{-}458$ ppm, $\text{Rb} = 70\text{-}98$ ppm). En cuanto a los lantánidos, se observa una concentración moderada: $\text{La} = 16.6 - 26.6$ ppm, $\text{Eu} = 0.63 - 0.71$ ppm e $\text{Yb} = 1.50 - 1.92$ ppm. De igual forma, los elementos de campo electrostático fuerte presentan concentraciones moderadas, por ejemplo: $\text{Zr} = 101\text{-}132$ ppm, $\text{Nb} = 8.4 - 12.7$ ppm y $\text{Hf} = 2.6 - 3.5$ ppm. Finalmente, las muestras presentan una retención parcial de metales de transición, como $\text{V} = 109\text{-}123$ ppm y $\text{Cr} = 45\text{-}52$ ppm.

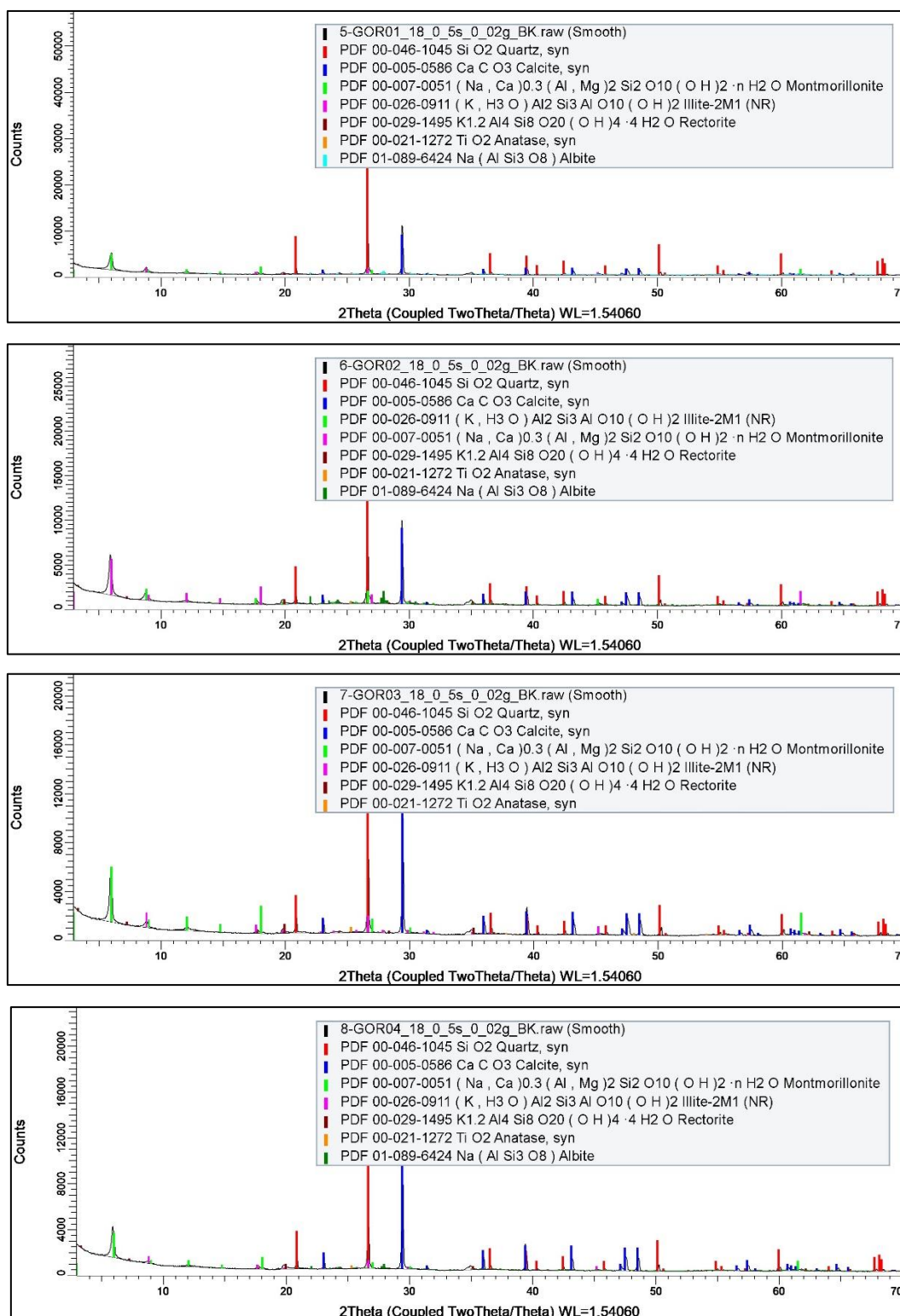


Figura 4.4: Patrones de difracción de rayos-X para los horizontes del perfil La Gorgonia. Radiación $\text{CuK}\alpha$, $1.54060 \text{ \AA}$, Barrido = $3\text{-}70^\circ$, Velocidad = $2^\circ/\text{min}$.

Tabla 4.2: Composición geoquímica (elementos mayores en % peso y elementos traza en ppm) de horizontes del perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L.

Elemento	GOR-01	GOR-02	GOR-03	GOR-04
SiO ₂	45.39	45.37	39.21	35.51
TiO ₂	0.57	0.60	0.51	0.48
Al ₂ O ₃	12.73	14.52	11.24	11.42
Fe ₂ O ₃	4.89	4.64	4.41	4.40
MnO	0.069	0.062	0.07	0.063
MgO	1.70	1.63	1.43	1.39
CaO	16.09	14.78	20.81	22.66
Na ₂ O	0.61	0.87	0.24	0.29
K ₂ O	2.18	2.53	1.74	1.68
P ₂ O ₅	0.115	0.131	0.119	0.098
PPI	16.24	15.51	0.58	22.40
Suma	100.584	100.64	100.36	100.39
H ₂ O	0.37	0.27	0.36	0.43
MO	1.27	1.31	2.04	2.43
Li	24.7	22.9	26.94	23.66
Be	1.619	1.72	1.5	1.49
B	32.9	35.1	24.34	20.84
Sc	11.0	10.7	9.83	9.65
V	123	115	112	109
Cr	52	45	46	45
Co	4.47	8.38	8.09	8.54
Ni	30.1	26.62	29.21	30.19
Cu	29.6	22.72	20.16	22.4
Zn	84	84.5	66.95	67.33
Ga	15.7	16.8	13.69	14.1
Rb	89	98	70	73
Sr	458	398	401	326
Y	16.6	16.24	16.27	14.89
Zr	115	132	103	101
Nb	9.9	12.7	8.4	8.8
Sn	1.88	2.0	1.55	1.57
Sb	0.64	0.72	0.66	0.68
Cs	3.88	4.57	3.95	4.43
Ba	308	345	260	256
La	18.4	26.6	16.9	16.6
Ce	37.3	48.73	34.9	35.07
Pr	4.35	5.55	4.15	4.06
Nd	16.4	19.9	16.02	15.23
Sm	3.36	3.61	3.3	3.008
Eu	0.69	0.71	0.70	0.63
Tb	0.48	0.48	0.459	0.42
Gd	3.08	3.1	3.013	2.73
Dy	2.88	2.9	2.74	2.5
Ho	0.60	0.6	0.65	0.52
Er	1.69	1.76	1.59	1.46
Yb	1.74	1.92	1.58	1.50
Lu	0.26	0.28	0.23	0.224
Hf	3.05	3.53	2.61	2.57
Ta	0.71	1.33	0.59	0.61
W	0.97	0.99	0.89	0.76
Tl	0.51	0.57	0.42	0.45
Pb	11.7	9.95	8.36	11.71
Th	7.17	8.21	5.85	6.39
U	1.95	3.42	1.86	2.05

PPI = pérdida por ignición (1000°C); MO = materia orgánica

4.2 Perfil La Nutria

4.2.1 Descripción del perfil edafológico

Se encuentra en las coordenadas 14R0418142 / 2754906 (altitud 520 msnm), en la ruta de senderismo La Nutria. El perfil muestra una longitud que alcanza los 18.0 m y con ~4.0 m de altura (Figuras 4.5-4.7), con una orientación W-E. Se encuentra constituido por cuatro horizontes: R (LNU-01; espesor = 1.20 m), C (LNU-02; espesor = 1.50 m), A (LNU-03; espesor = 0.80 m) y O (LNU-04; espesor = 0.50 m).

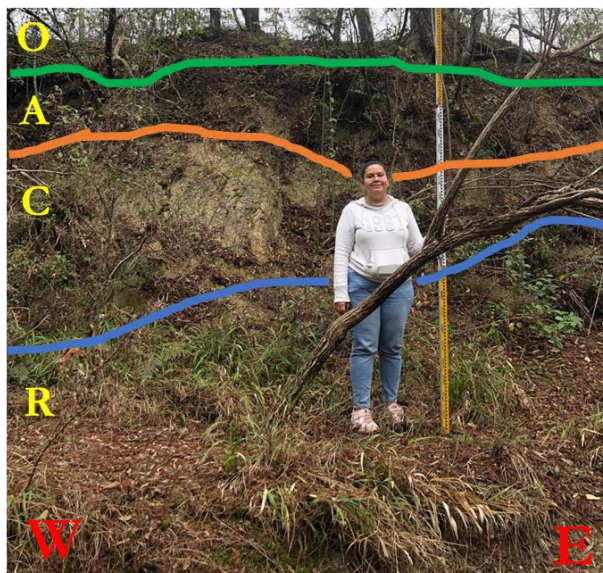


Figura 4.5: Estructura del perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L.



Figura 4.6: Afloramiento de roca madre intemperizada del perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L.

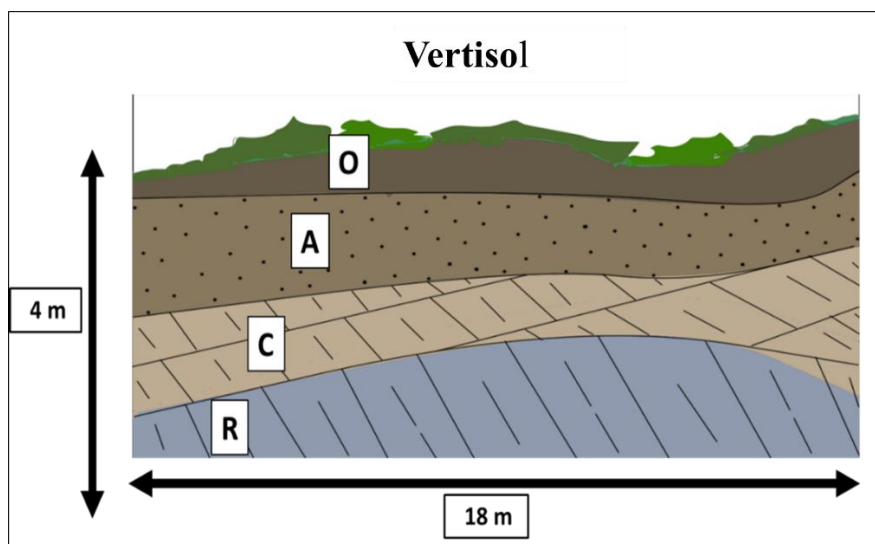


Figura 4.7: Esquema del perfil de suelo La Nutria (Linares, N.L.), con la distribución de horizontes y dimensiones.

El perfil La Nutria se ubica en los márgenes de un arroyo con flujo intermitente. El horizonte R (1.20 m) está constituido por estratos delgados (<20 cm de espesor) de lutita (Formación Méndez). El horizonte C (1.50 m) está conformado por la misma litología, aunque con una fuerte evidencia de intemperismo y fracturamiento. El horizonte A (0.80 m) se caracteriza por mostrar una consistencia lodosa, sin evidencia de fragmentos de la roca madre. El perfil culmina con 0.5 m de un horizonte de tonalidad oscura (tipo O), que incluye materia orgánica. En comparación al resto de las localidades, sobre el horizonte O destaca la presencia de vegetación abundante, consistente de arbustos y árboles de gran desarrollo. Estas características sugieren la estructura de un vertisol, comparable a lo reportado por [Cantú Silva y González Rodríguez \(2014\)](#) en la Región Citrícola de Nuevo León.

4.2.2 Parámetros físicoquímicos, mineralógicos y geoquímicos

El análisis físicoquímico ha revelado pH básicos (7.45– 7.75) con conductividades eléctricas en el intervalo de 81.0 – 134.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ([Tabla 4.3](#)). Las texturas dominantes son la franco-arcillosa y arcillosa. El contenido de carbonatos (7.8 - 12.6%) y la materia orgánica (0.59 – 6.07%) se incrementan con el desarrollo del perfil, en el que dominan las texturas franco-arcillosas.

Tabla 4.3: Parámetros fisicoquímicos del perfil La Nutria (Linares, N.L.)

Muestra	Horizonte	pH	Cond. Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Materia Orgánica		Textura			Clasificación Agronómica	% Carbonatos	Contenido de Carbonato total
				% C total	% C org	% Arena	% Limo	% Arcilla			
LNU-01	R	7.75	81.0	0.59	0.34	67.16	14.00	18.84	Franco arenoso	7.80	Frecuente
LNU-02	C	7.61	102.9	2.80	1.65	43.16	28.00	28.84	Franco arcilloso	4.50	Frecuente
LNU-03	A	7.53	102.1	4.02	2.33	15.16	40.00	44.84	Franco arcilloso	12.10	Abundante
LNU-04	O	7.45	134.4	6.07	3.52	21.16	40.42	38.42	Arcilloso	12.60	Abundante

En la **Figura 4.8** se presentan los patrones de difracción de rayos-X de los horizontes del perfil La Nutria. Las muestras se encuentran constituidas por las siguientes fases minerales: (a) cuarzo, SiO_2 , (b) calcita, CaCO_3 , (c) montmorillonita, $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, (d) illita 2M1, $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$, (e) rectorita, $\text{K}_{1.2}\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, (f) anatasa, TiO_2 y (g) albita, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$.

Por otra parte, se realizó el análisis de elementos mayores (% peso) y traza (ppm) en los horizontes bajo estudio (**Tabla 4.4**). Las muestras se caracterizan por mostrar una concentración dominante de $\text{SiO}_2 = 41.71 - 54.64\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.78 - 17.13\%$, $\text{CaO} = 4.62 - 14.47\%$, $\text{K}_2\text{O} = 1.65 - 2.22\%$. Su presencia se correlaciona con un arreglo mineral de cuarzo, calcita, albita y minerales arcillosos. Es importante mencionar el incremento significativo en materia orgánica de 1.5 a 7.4%.

Los horizontes se caracterizan por un contenido de elementos litófilos relativamente alto ($\text{Ba} = 335 - 404$ ppm, $\text{Sr} = 94 - 374$ ppm, $\text{Rb} = 73 - 89$ ppm). En cuanto a los lantánidos, se observan concentraciones moderadas, por ejemplo: $\text{La} = 19.8 - 26.2$ ppm, $\text{Eu} = 0.8 - 1.20$ ppm e $\text{Yb} = 1.7 - 2.3$ ppm. De igual forma, los elementos de campo electrostático fuerte presentan composiciones moderadas, por ejemplo: $\text{Zr} = 127 - 161$ ppm, $\text{Nb} = 10.5 - 13.2$ ppm y $\text{Hf} = 3.3 - 4.2$ ppm. Finalmente, las muestras presentan retención de metales de transición, como $\text{V} = 107 - 150$ ppm y $\text{Cr} = 42 - 60$ ppm.

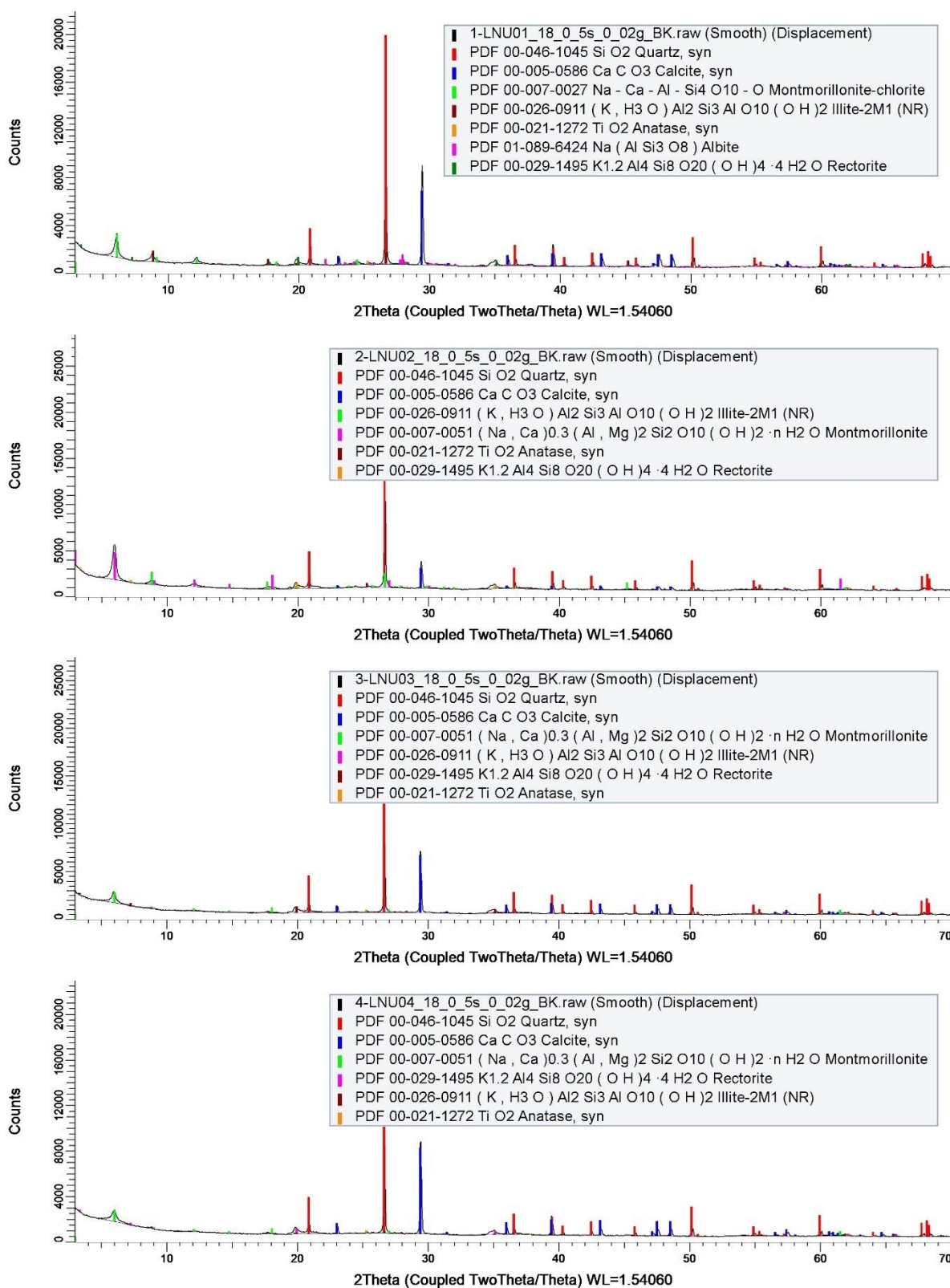


Figura 4.8: Patrones de difracción de rayos-X para los horizontes del perfil La Gorgonia. Radiación CuK α , 1.54060 Å, Barrido = 3-70°, Velocidad = 2°/min.

Tabla 4.4: Composición geoquímica (elementos mayores en % peso y elementos traza en ppm) de horizontes del perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L.

Elemento	LNU-01	LNU-02	LNU-03	LNU-04
SiO ₂	47.77	54.64	43.33	41.71
TiO ₂	0.67	0.79	0.61	0.59
Al ₂ O ₃	14.63	17.13	12.88	12.78
Fe ₂ O ₃	5.81	8.36	5.04	5.15
MnO	0.141	0.174	0.134	0.128
MgO	1.77	1.85	1.33	1.34
CaO	12.78	4.62	13.95	14.47
Na ₂ O	0.67	0.33	0.29	0.27
K ₂ O	2.14	2.22	1.65	1.68
P ₂ O ₅	0.132	0.189	0.130	0.132
PPI	14.37	10.30	20.61	21.84
Suma	100.88	100.60	99.95	100.09
H ₂ O	0.25	0.56	0.75	0.76
MO	1.51	3.2	6.59	7.42
Li	33	48	29	26
Be	1.8	2.09	1.65	1.53
B	39.37	44.8	22.57	7.25
Sc	12.15	14.86	10.89	9.75
V	126.36	149.61	116.97	107.18
Cr	50.22	60.35	47.71	42.27
Co	8.98	22.97	12.11	11.56
Ni	30.99	40.91	28.87	26.41
Cu	25.45	29.84	24.03	22.72
Zn	86.65	117.22	81.75	74.04
Ga	18.19	21.35	16.69	15.35
Rb	88.01	73.32	77.79	88.8
Sr	374.36	141.91	105.8	94.18
Y	17.32	22.82	17.49	16.18
Zr	138.4	160.99	132.54	126.96
Nb	11.74	13.17	11.17	10.52
Sn	1.86	2.19	1.91	1.78
Sb	0.75	1.6	1.12	1.07
Cs	4.53	6.36	5.69	5.31
Ba	352.5	404.4	365.7	335.2
La	20.91	26.23	20.9	19.79
Ce	47.48	59.38	46.07	43.26
Pr	5.18	6.59	5.16	4.86
Nd	19.47	25.21	19.28	18.31
Sm	3.97	5.27	3.92	3.71
Eu	0.89	1.2	0.87	0.81
Tb	0.54	0.71	0.54	0.5
Gd	3.5	4.73	3.51	3.29
Dy	3.18	4.11	3.17	2.96
Ho	0.64	0.8	0.64	0.59
Er	1.8	2.25	1.79	1.67
Yb	1.86	2.26	1.819	1.7
Lu	0.27	0.33	0.26	0.25
Hf	3.58	4.16	3.4	3.26
Ta	1.11	0.92	0.77	0.73
W	0.94	1.04	0.98	0.81
Tl	0.52	0.59	0.51	0.47
Pb	11.04	20.64	17.9	16.44
Th	7.62	8.88	7.47	6.96
U	1.93	2.51	1.99	1.86

4.3 Perfil El Poblado

4.3.1 Descripción del perfil edafológico

Este se ubica en las coordenadas 14R0424201/ 2754370 (altitud 541 msnm), en la comunidad El Poblado. De forma general, el perfil se extiende 16 m de longitud y 3 m de altura (Figuras 4.9-4.10), con una orientación N-S. Se encuentra constituido por cinco horizontes: R (EP-01; espesor = 3 m), C (EP-02; espesor = 2.3 m), B (EP-03; espesor = 2.2 m), O (EP-04; espesor = 0.20 m) y A (EP-05; espesor = 0.2 m).

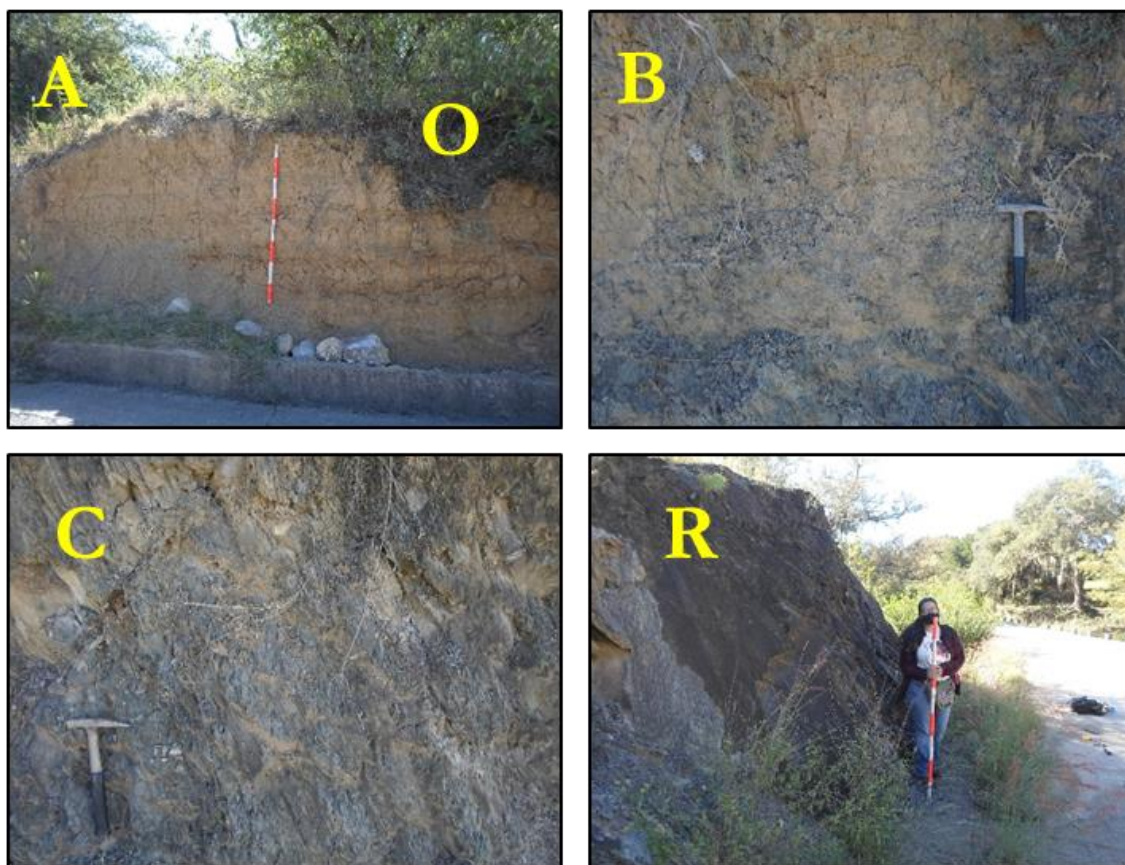


Figura 4.9: Estructura del perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L.

El perfil El Poblado se ubica al costado de un arroyo de corriente intermitente. El horizonte R (4.00 m) está representado por intercalaciones de lutita (Formación Méndez; <60 cm de espesor). El horizonte C (2.50 m) está conformado por restos de lutita alterada. El horizonte B (2.00 m) muestra una completa desintegración de la roca madre y encontrándose en este la primera actividad vegetal visible. En horizonte A (8.00 m) se caracteriza por ser un gran masivo de material arcilloso,

aparentemente sin relación con la lutita. El perfil termina con 0.2 m de un horizonte de tonalidad oscura (tipo O) que incluye materia orgánica. El perfil puede considerarse un punto de transición entre dos tipos de suelo con un origen distinto (Figura 4.8): (a) se inicia con un cambisol (R → B2), el cual es parcialmente cubierto por un (b) fluvisol (A3). Estos tipos de suelo han sido reportados por Cantú Silva y González Rodríguez (2014) en la Región Citrícola de Nuevo León.

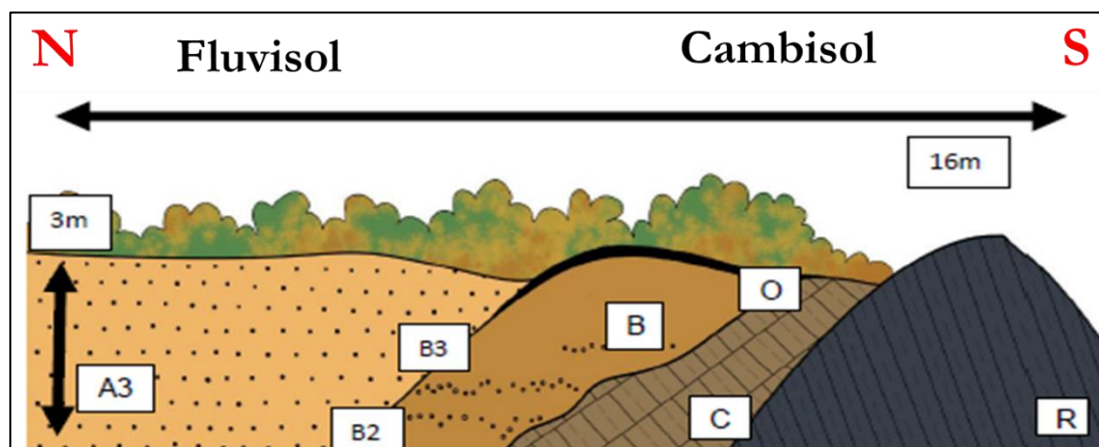


Figura 4.10: Esquema del perfil de suelo El Poblado (Linares, N.L.), con la distribución de horizontes y dimensiones.

4.3.2 Parámetros fisicoquímicos, mineralógicos y geoquímicos

El análisis fisicoquímico ha revelado que los horizontes muestran un pH básico (7.40 – 7.60) y conductividad eléctrica variable de 66.0 – 1850.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 4.5). Las texturas dominantes son la franco-arenosa y arenosa. El contenido de carbonatos (4.6 – 12.3%) y materia orgánica (0.16 – 2.25%) se incrementa con el desarrollo del perfil.

Tabla 4.5 Parámetros fisicoquímicos del perfil El Poblado (Linares, N.L.)

Muestra	Horizonte	pH	Cond. Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Materia Orgánica		Textura			Clasificación Agronómica	% Carbonatos	Contenido de Carbonato total
				% C total	% C org	% Arena	% Limo	% Arcilla			
EP-01	R	7.50	485.0	0.40	0.23	95.60	3.30	1.10	Arenosa	5.60	Frecuente
EP-02	C	7.60	69.5	0.42	0.24	87.60	5.30	7.10	Arenosa	4.60	Frecuente
EP-03	B	7.60	66.0	0.24	0.14	33.60	57.30	9.10	Franco arenosa	8.30	Frecuente
EP-04	O	7.60	83.3	2.25	1.30	47.60	32.30	21.10	Franca	7.80	Frecuente
EP-05	A	7.40	1850.5	0.16	0.09	21.60	47.30	31.10	Arcillosa	12.30	Abundante

En la Figura 4.11 se presentan los patrones de difracción de rayos-X de los horizontes del perfil El Poblado. Las muestras incluyen las siguientes fases minerales: (a) albita, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, (b) calcita, CaCO_3 , (c) clorita $(\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{OH})_6$, (d) illita 2M1 , $(\text{K,H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ y (e) cuarzo, SiO_2 .

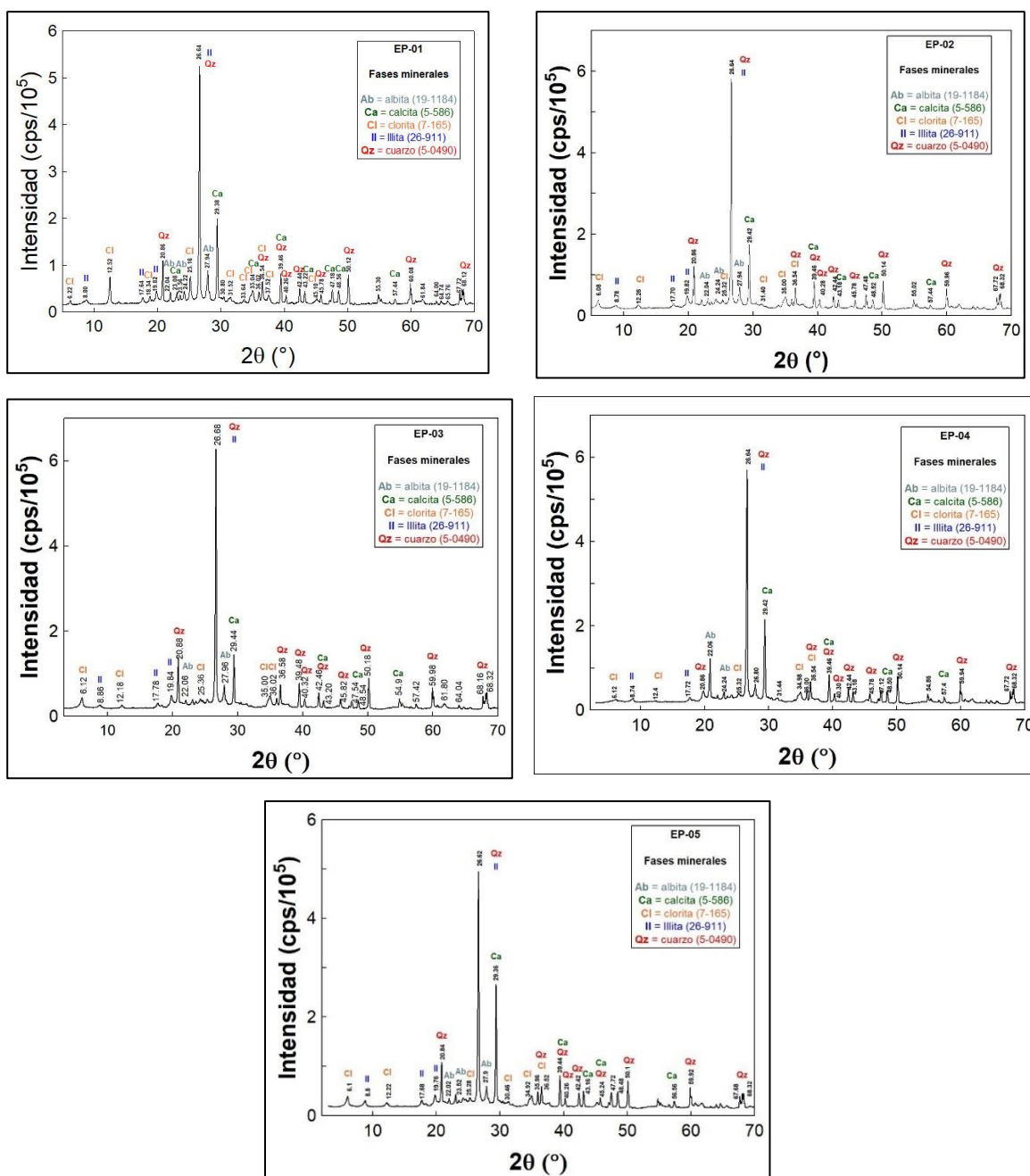


Figura 4.11: Fases minerales en roca total de muestras del perfil de suelo El Poblado.

En la **Tabla 4.6** se reporta la composición química de los horizontes que conforman el perfil El Poblado. Las muestras se caracterizan por mostrar contenidos relativamente altos de $\text{SiO}_2 = 49.06 - 56.67\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.39 - 15.47\%$ y $\text{CaO} = 7.34 - 9.60\%$. Además, los estratos acumulan entre 5.28 y 5.69% de Fe_2O_3 y 2.03 – 2.24% de K_2O . Estos elementos son la base del arreglo de minerales observado por difracción de rayos-X: cuarzo, calcita, albita y minerales arcillosos. Es importante

mentonar que los horizontes incluyen gran cantidad de volátiles (H_2O y CO_2) químicamente unidos, con PPI entre 10.24 y 20.29%. El contenido de materia orgánica es relativamente bajo ($< 1.90\%$), salvo el horizonte EP-04 que alcanza los 10.35%.

Los elementos litófilos se concentran en las muestras (Ba = 323 – 352 ppm, Sr = 169 – 315 ppm, Rb = 86 – 97 ppm). Se observa un contenido moderado de lantánidos, por ejemplo: La = 21.7 – 26.9 ppm, Eu = 0.86 – 0.98 ppm e Yb = 1.91 – 2.26 ppm. De igual forma, los elementos de campo electrostático fuerte presentan una composición moderada, por ejemplo: Zr = 145 – 159 ppm, Nb = 12.0 – 13.2 ppm y Hf = 3.9 – 4.2 ppm. Finalmente, las muestras han retenido metales de transición, como V = 112 – 132 ppm y Cr = 46 – 58 ppm.

4.4 Perfil Las Raíces

4.4.1 Descripción del perfil edafológico

Este se localiza en las coordenadas 14R0418142 / 2754906 (altitud 406 msnm), en la comunidad Las Raíces. El perfil se extiende a una longitud de 46 m y 8 m de altura (**Figuras 4.12-4.13**), con una orientación E-W. Se encuentra constituido por cinco horizontes: R (RA1-01; espesor = 1.0 m), C (RAI-02; espesor = 0.4 m), A2 (RAI-03; espesor = 2.6 m), A1 (RAI-04; espesor = 2.4 m) y O (RAI-05; espesor = 0.4 m).

El perfil Las Raíces se encuentra al costado del cauce de un arroyo con flujo perenne. El horizonte R (~1.00 m) está constituido por estratos (< 6 m de largo) de lutita Méndez. El horizonte C (0.4 m) está conformado por la misma litología, aunque con evidencia de fuerte intemperismo. El horizonte A (6.00 m) ocurre como un cuerpo masivo de material arcilloso, que probablemente representa un depósito de inundación. El perfil termina con 0.4 m de un horizonte de tonalidad oscura (tipo O) por acumulación de materia orgánica. Este perfil tiene la singularidad de integrar dos tipos de suelo, en donde se interrumpió la formación de un leptosol derivado de lutita al ser cubierto por un fluvisol (**Figura 4.13**). Estos tipos de suelo son representativos en la Región Citrícola (Cantú Silva y González Rodríguez, 2014).

Tabla 4.6: Composición geoquímica (elementos mayores en % peso y elementos traza en ppm) de horizontes del perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L.

Elemento	EP-01	EP-02	EP-03	EP-04	EP-05
SiO ₂	52.19	55.68	56.67	49.06	54.85
TiO ₂	0.70	0.66	0.70	0.62	0.65
Al ₂ O ₃	15.47	15.05	14.62	13.39	13.86
Fe ₂ O ₃	5.60	5.64	5.69	5.28	5.64
MnO	0.132	0.125	0.096	0.114	0.091
MgO	1.96	1.67	1.73	1.56	1.78
CaO	9.60	8.02	7.34	7.45	9.23
Na ₂ O	1.69	1.38	0.97	0.80	1.10
K ₂ O	2.21	2.09	2.16	2.03	2.24
P ₂ O ₅	0.131	0.109	0.106	0.115	0.140
PPI	11.20	10.24	10.45	20.29	11.32
Suma	100.88	100.66	100.53	100.71	100.90
H ₂ O	0.14	0.19	0.52	0.52	0.41
MO	0.73	1.48	1.90	10.35	1.63
Li	36	33	40	35	34
Be	1.86	1.78	1.85	1.83	1.79
B	46	39	41	27	29
Sc	11.9	11.1	12.5	12.1	11.7
V	120	112	131	126	132
Cr	48	46	58	54	57
Co	13.5	10.1	10.4	11.5	11.7
Ni	27.8	25.5	30.4	29.5	31.3
Cu	25.5	23.8	25.8	24.9	27.9
Zn	81	80	88	86	92
Ga	19.2	18.4	18.2	18.1	17.3
Rb	93	86	97	94	95
Sr	315	234	216	169	209
Y	18.2	18.7	22.6	21.6	21.2
Zr	145	147	159	158	152
Nb	13.2	12.9	13.1	12.4	12.0
Sn	2.12	2.05	2.06	2.03	1.96
Sb	1.09	0.92	1.08	1.07	1.08
Cs	6.0	5.7	6.5	6.1	6.0
Ba	343	338	331	352	323
La	21.7	22.6	24.5	26.9	23.8
Ce	50.1	51.4	50.3	57.9	50.8
Pr	5.4	5.6	6.0	6.8	5.8
Nd	20.2	20.7	22.4	25.3	21.4
Sm	4.21	4.28	4.53	4.90	4.34
Eu	0.91	0.86	0.94	0.98	0.90
Tb	0.57	0.58	0.63	0.65	0.6
Gd	3.71	3.75	4.09	4.27	3.92
Dy	3.37	3.42	3.8	3.78	3.63
Ho	0.67	0.68	0.77	0.76	0.74
Er	1.89	1.9	2.23	2.16	2.09
Yb	1.91	1.93	2.26	2.18	2.13
Lu	0.28	0.28	0.34	0.32	0.31
Hf	3.91	3.92	4.19	4.15	3.99
Ta	0.93	0.94	0.94	0.9	0.87
W	1.05	1.11	1.08	1.00	1.07
Tl	0.57	0.54	0.62	0.58	0.59
Pb	17.7	13.8	13.6	16.0	15.5
Th	9.0	9.6	8.9	9.0	8.2
U	2.24	2.36	2.56	2.36	2.46

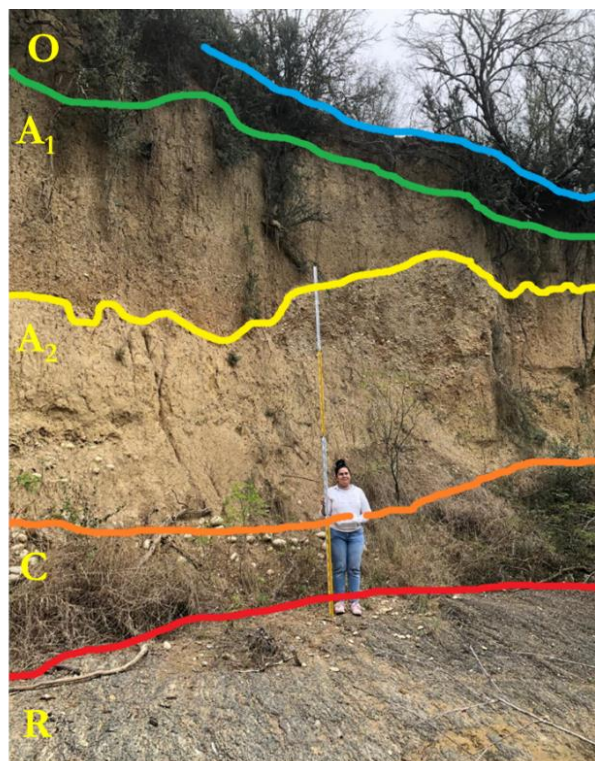


Figura 4.12: Estructura del perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L.

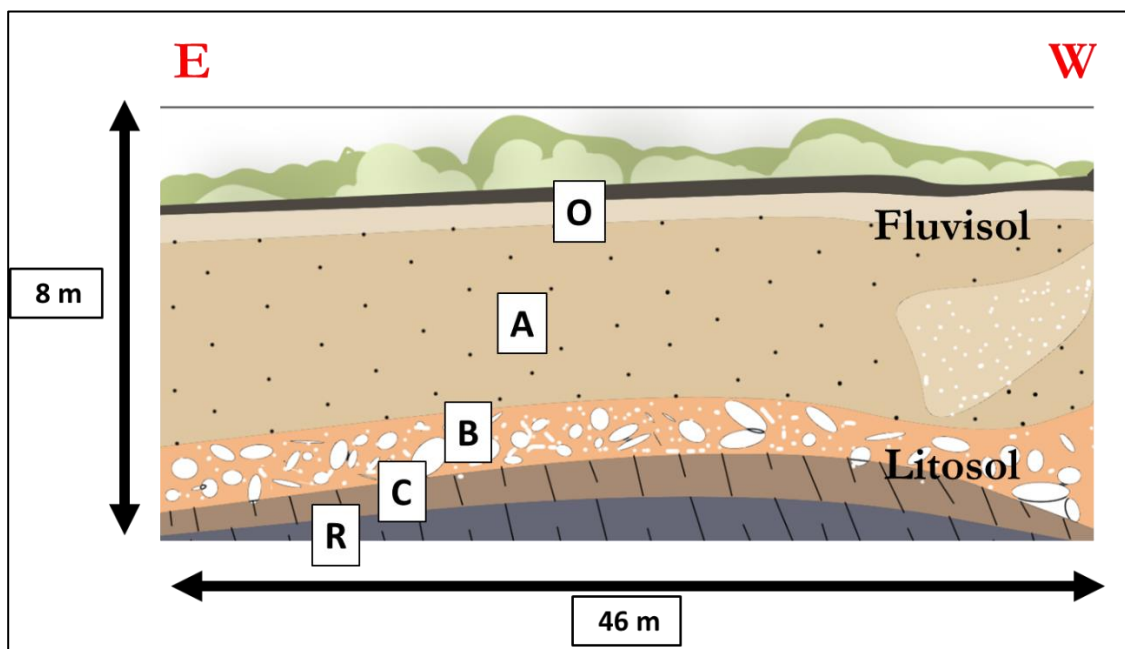


Figura 4.13: Esquema del perfil de suelo Las Raíces (Linares, N.L.), con la distribución de horizontes y dimensiones.

4.4.2 Parámetros fisicoquímicos, mineralógicos y geoquímicos

El análisis fisicoquímico ha revelado un pH básico (7.71 – 8.18) para los horizontes, acompañados de conductividad eléctrica de 63.9 – 410.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 4.7). Las texturas dominantes son la arcillo-limosa y arcillosa. El contenido de carbonatos (4.2 – 22.0%) y la materia orgánica (0.54 – 2.50%) se incrementan con el desarrollo del perfil, con una disminución en el contenido de fracción arcillosa.

Tabla 4.7: Parámetros fisicoquímicos del perfil Las Raíces (Linares, N.L.).

Muestra	Horizonte	pH	Cond. Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Materia Orgánica		Textura			Clasificación Agronómica	% Carbonatos	Contenido de Carbonato total
				% Total	% C org	% Arena	% Limo	% Arcilla			
RAI-01	R	7.81	63.9							4.20	Abundante
RAI-02	C	8.18	410.0	0.54	0.31	5.52	44.00	50.48	Arcillo limoso	12.60	Abundante
RAI-03	B	7.90	181.0			15.52	34.00	50.48	Arcilloso	14.10	Abundante
RAI-04	A	7.71	108.6	1.13	0.65	23.52	40.00	36.48	Franco arcilloso	17.20	Abundante
RAI-05	O	7.75	119.3	2.50	1.40	7.52	50.00	24.48	Arcillo-limoso	22.00	Abundante

En la Tabla 4.8 se reporta la composición química de los horizontes del perfil compuesto de suelo Las Raíces. Sus componentes principales incluyen el $\text{SiO}_2 = 46.22 - 54.98\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.79 - 16.23\%$ y $\text{CaO} = 7.08 - 15.08\%$. Otros componentes importantes son el $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4.75 - 6.08\%$ y el $\text{K}_2\text{O} = 1.74 - 2.09\%$. Todas las muestras presentan valores relativamente altos de PPI = 10.05 – 17.66%, acompañados de acumulación de materia orgánica (MO = 1.65 – 3.42%).

Los elementos litófilos se concentran en los horizontes del perfil Las Raíces, por ejemplo: Ba = 291-330 ppm, Rb = 76-89 ppm y Sr = 182 – 230 ppm. Los elementos lantánidos se acumulan de forma moderada (La = 22.7 – 27.2 ppm, Eu = 0.86 – 1.00 ppm e Yb = 1.79 – 2.14 ppm). De igual forma, elementos de campo electrostático fuerte se caracterizan por una composición baja a moderada, por ejemplo Zr = 135 – 195 ppm, Nb = 10.4 – 12.8 ppm y Hf = 3.48 – 4.74 ppm. Finalmente, las muestras incluyen metales de transición, tal como Cr = 43 – 48 ppm, Ni = 25.2 – 28.4 ppm y V = 104 – 127 ppm.

Tabla 4.8: Composición geoquímica (elementos mayores en % peso y elementos traza en ppm) de horizontes del perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L.

Elemento	RAI-01	RAI-02	RAI-03	RAI-04	RAI-05
SiO ₂	54.98	54.75	50.41	49.31	46.22
TiO ₂	0.73	0.64	0.60	0.57	0.55
Al ₂ O ₃	16.23	12.46	11.79	12.44	11.86
Fe ₂ O ₃	6.08	4.91	4.75	5.17	4.90
MnO	0.073	0.102	0.101	0.109	0.104
MgO	1.55	1.53	1.46	1.56	1.49
CaO	7.08	10.67	13.53	12.78	15.08
Na ₂ O	1.30	1.10	0.81	0.84	0.77
K ₂ O	2.09	1.87	1.74	1.89	1.91
P ₂ O ₅	0.121	0.119	0.115	0.140	0.145
PPI	10.05	12.57	14.80	15.73	17.66
Suma	100.28	100.72	100.11	100.54	100.69
H ₂ O	0.33	0.44	0.43	0.47	0.39
MO	1.65	1.70	1.82	2.96	3.42
Li	36	33	32	34	30
Be	1.86	1.67	1.58	1.63	1.53
B	54	15.1	15.1	20.8	18.7
Sc	13.4	10.0	9.5	9.7	9.1
V	127	109	104	111	105
Cr	48	48	45	45	43
Co	13.0	11.6	13.0	13.3	12.4
Ni	25.2	27.7	27.7	28.4	27.8
Cu	24.9	22.8	21.6	25.7	21.3
Zn	88	79	79	80	73
Ga	20.0	15.3	14.5	15.1	14.5
Rb	89	82	76	80	76
Sr	230	191	182	208	197
Y	18.4	21.9	22.7	20.0	18.0
Zr	149	183	195	143	135
Nb	12.8	12.6	11.6	11.0	10.4
Sn	2.06	1.79	1.75	1.77	1.75
Sb	1.00	1.05	5.0	1.09	1.10
Cs	7.4	5.6	5.3	5.5	5.2
Ba	330	321	300	297	291
La	23.2	25.2	25.1	22.7	27.2
Ce	54	53	53	49	59
Pr	5.8	6.1	6.1	5.5	6.6
Nd	21.7	22.7	22.9	21.0	23.6
Sm	4.6	4.5	4.7	4.4	4.4
Eu	1.00	0.93	0.96	0.91	0.86
Tb	0.61	0.62	0.63	0.59	0.55
Gd	4.04	4.09	4.22	3.90	3.72
Dy	3.57	3.72	3.73	3.46	3.17
Ho	0.70	0.75	0.75	0.69	0.63
Er	1.98	2.12	2.10	1.95	1.80
Yb	2.03	2.14	2.08	1.95	1.79
Lu	0.30	0.32	0.30	0.29	0.26
Hf	4.01	4.74	4.49	3.79	3.48
Ta	0.92	0.92	0.73	0.78	0.73
W	0.94	1.05	1.10	0.91	1.01
Tl	0.56	0.54	0.50	0.51	0.48
Pb	20.7	15.29	15.45	16.63	14.75
Th	9.3	8.4	7.9	7.9	7.4
U	2.29	2.44	2.22	2.23	2.08

4.5 Referencias

Cantú Silva, I., González Rodríguez, H. 2014. Capítulo 4. Suelos y aguas superficiales. En: López López, A., Pando Moreno, M. (eds.), Región Citrícola de Nuevo León: Su complejidad territorial en el marco global. Instituto de Geografía, UNAM – Facultad de Ciencias Forestales, UANL, p. 61-75.

5. DISCUSIÓN

5.1 Clasificación de perfiles de suelo de acuerdo con esquema WRB

A partir de la revisión de información edafológica del [INEGI \(2025\)](#) y de dos documentos de tesis ([Loera García, 2016](#); [Platas Castillo, 2016](#)), se preparó una base de datos para 32 perfiles de suelo con una distribución aleatoria dentro del área de estudio ([Figura 5.1](#)). De acuerdo con las descripciones de campo, estos corresponderían a: (a) leptosol-litosol (10), (b) vertisol (6), chernozem (3), regosol (4), phaeozem (2), luvisol (2), rendzina (2), cambisol (1), gypsisol (1) y calcisol (1).

Durante este trabajo, se han identificado perfiles de suelo que corresponden a leptosol (La Gorgonia, parte inferior de Raíces), vertisol (La Nutria), cambisol (la parte inferior de El Poblado) y fluvisol (partes superiores de Raíces y El Poblado).

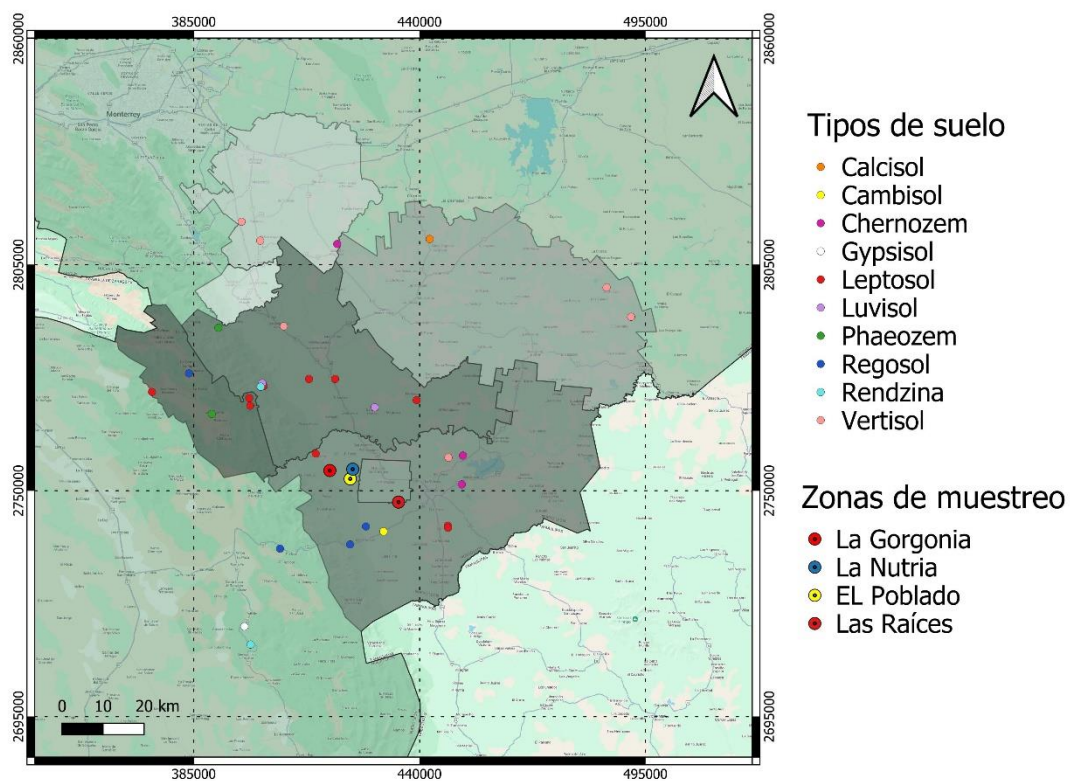


Figura 5.1: Distribución de perfiles de suelo y clasificación descritos en la literatura y este trabajo dentro del área de estudio.

5.2 Variación de parámetros fisicoquímicos durante la pedogénesis

La textura de un suelo determina aspectos que incluyen drenaje, aireación, retención de agua y nutrientes, y potencial de erosión (Pereira et al., 2017). Se ha mencionado que los suelos arenosos presentan un drenaje excesivo, lo que provoca que las plantas tengan un aprovechamiento de agua muy limitado. El incremento en arcillas provoca la disminución en la capacidad de drenaje, por retención del agua. Por lo antes expuesto, los suelos francos al mostrar una proporción similar de componentes representan suelos con condiciones equilibradas de drenaje. En cuanto a la erosión, los suelos arenosos son muy vulnerables a las de tipo eólica e hídrica debido a la falta de cohesión entre sus partículas. Aunque cohesivos, los suelos arcillosos o limosos se erosionan fácilmente con lluvias fuertes y al secarse forman terrones que se disgregan. Por otro parte, la incorporación de arcillas favorece la acumulación de nutrientes (Peoples et al., 2014): (a) macroelementos (N, P, K), elementos medios (Ca, Mg, Si) y oligoelementos (B, Mo, Zn, Al, etc.).

De acuerdo con los análisis de textura, en los perfiles de suelo bajo estudio de la Región Citrícola existe una tendencia general de fases predominantemente arenosas que evolucionan hacia fases limo-arcillosas (Figura 5.2). Esto ha favorecido las condiciones para el cultivo de cítricos actualmente y de la caña de azúcar en el pasado. Molina (2000) señaló que, aunque se presentan en diversos tipos de suelo, los cítricos prefieren suelos ligeros con una textura franco-arenosa, franca o franco-arcillosa, con buen drenaje y aireación.

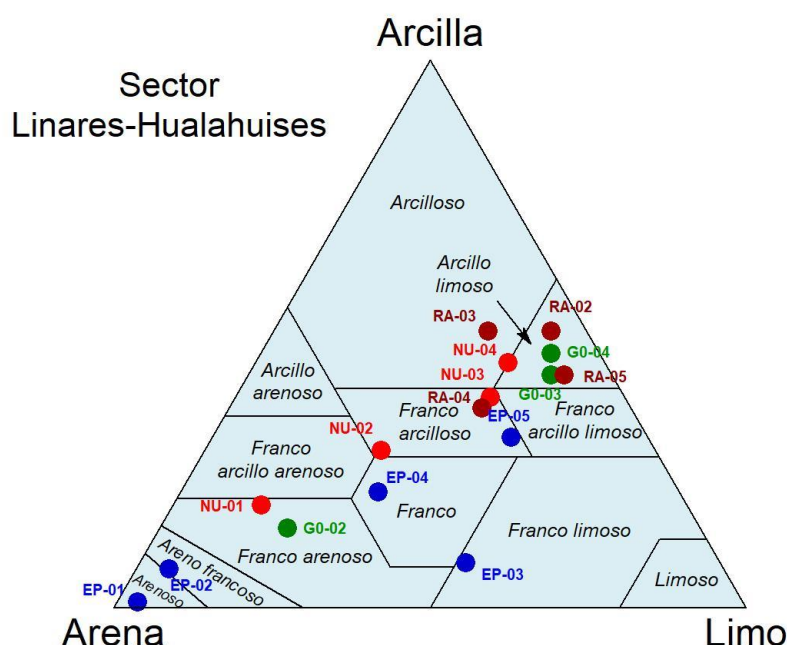


Figura 5.2: Clasificación por tamaño de partícula para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.

En general, los horizontes de suelo de la Región Citrícola presentan un intervalo de pH de ligeramente básico a básico (7.4 a 8.2; [Tablas 4.1, 4.3, 4.5 y 4.7](#); [Figura 5.3](#)), aunque los correspondientes al perfil Raíces son los más altos (>7.7) debido a una fuerte concentración de limos carbonatados ([Tabla 4.7](#)). Este comportamiento es común en suelos de zonas áridas y semi-áridas, siendo un efecto que reduce la disponibilidad de nutrientes como hierro y zinc. De acuerdo con [Molina \(2000\)](#), los suelos bajo estudio mostrarían valores de pH en límite superior del intervalo óptimo para el cultivo de cítricos (5.5-7.0).

La conductividad eléctrica del suelo es un parámetro complejo influenciado por una combinación de propiedades fisicoquímicas ([Simon et al., 2013](#)): tipo, textura, contenido de materia orgánica, humedad, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, pH y contenidos Ca^{+2} y Mg^{+2} . En el caso de los suelos de la Región Citrícola ([Figura 5.3](#)), la conductividad eléctrica presenta valores <180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con excepción de los horizontes EP-01 (485 $\mu\text{S}/\text{cm}$), EP05 (1850 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y RAI02 (410 $\mu\text{S}/\text{cm}$), que probablemente esté relacionado a acumulación de sales. [Simon et al. \(2013\)](#) han señalado que la conductividad eléctrica representa un potencial estimador de contenido de arcilla y humedad. Además, han sugerido que suelos con < 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ son, en general, favorables para el desarrollo de cultivos.

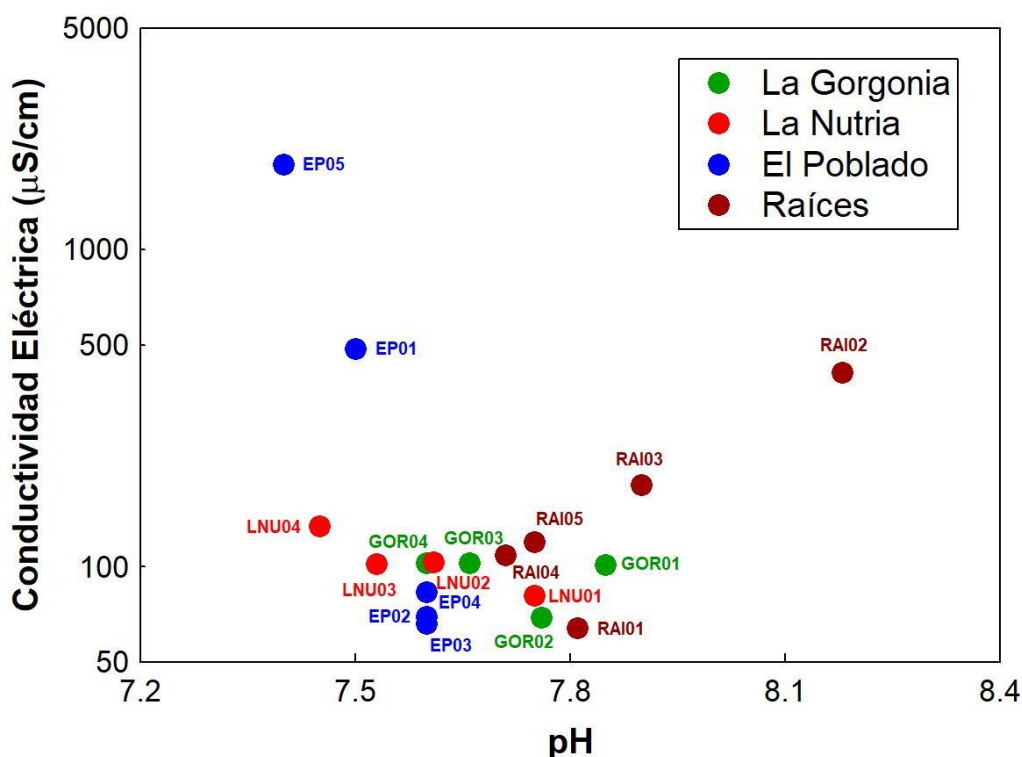


Figura 5.3: Variación de pH y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.

Por otra parte, el contenido de materia orgánica es relativamente bajo en los perfiles (< 3.0%, [Figura 5.4](#)), con excepción de las muestras LNU03 (4.0%) y LNU04 (6.0%) ([Tabla 4.3](#)). Estos resultados son comparables a los reportados para México (en general, < 1%). Cabe mencionar que la materia orgánica favorece la retención de nutrientes (por ejemplo N) y el intercambio de cationes, además de limitar la erosión ([Trinidad-Santos y Velasco-Velasco, 2016](#)).

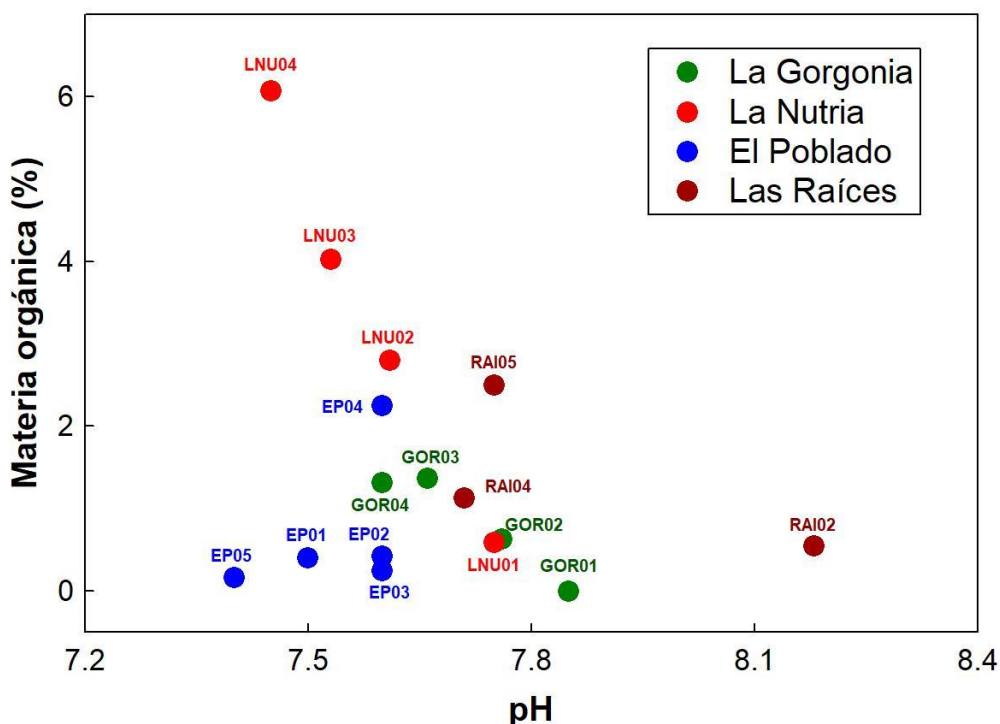


Figura 5.4: Variación de pH y materia orgánica (%) para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.

Los horizontes de los perfiles de La Nutria, El Poblado y de la parte basal de La Gorgonia se caracterizan por incluir <12.0% de carbonatos ([Figura 5.5](#)). Sin embargo, una acumulación importante de carbonatos es observada en las muestras RAI04 (17.2%), RAI05 (22.0%), GOR03 (20.0%) y GOR04 (25.0%) ([Tablas 4.1 y 4.7](#)). [Ovalle et al. \(2023\)](#) reportaron que los carbonatos inorgánicos en el suelo de zonas áridas y semiáridas se componen de dos tipos: (a) primarios o litogénicos, que son aquellos que se conservan como detritos del material parental (en este caso, las unidades calcáreas de la Sierra Madre Oriental) y (b) secundarios o pedogénicos, que son aquellos neoformados en el perfil de suelo por la precipitación de HCO_3^- , durante los ciclos de secado y humectación en suelos no ácidos que contienen cationes de Ca^{+2} o Mg^{+2} disueltos.

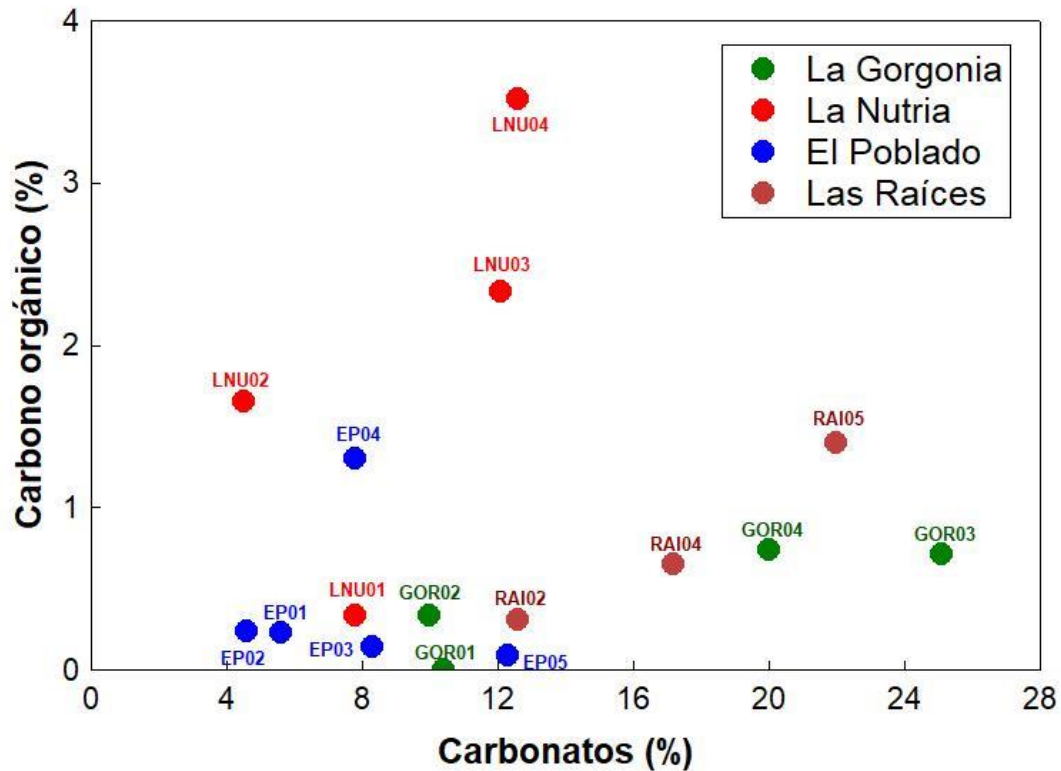


Figura 5.5: Variación de Carbonatos (%) y carbón orgánico (%) para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.

5.3 Variación de parámetros geoquímicos durante la pedogénesis

El desarrollo edafológico en el área de estudio se distingue por una acumulación de carbonatos y arcillas, lo cual se ve reflejado por un dominio de CaO y Al_2O_3 sobre Fe_2O_3 y los álcalis (Na_2O y K_2O) (Figura 5.6). Además, la relación $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ disminuye con el descenso topográfico, mientras que la de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ se incrementa (Figura 5.7).

Por otra parte, durante el presente estudio se efectuó un análisis de la movilidad elemental durante la pedogénesis, de acuerdo con la metodología descrita en Faure (1997). En este ejercicio se parte de la composición en elementos mayores de la roca madre (el primer horizonte de cada perfil, etiquetado como A en las Tablas 5.1-5.14). Este se compara con cada uno de los estratos subsiguientes (etiquetados como B en las Tablas 5.1-5.14). Para cada elemento mayor, incluyendo la pérdida por ignición (PPI) y el agua (H_2O), se estableció una composición remanente (etiquetada como C en las Tablas 5.1-5.14) en la que el Al_2O_3 se considera un elemento no móvil, tal que $A_{\text{Al}_2\text{O}_3} = C_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ (i.e., durante la alteración dicho elemento se acumula en los estratos), a partir de la ecuación:

$$C = \frac{\%Al_2O_3 \text{ remanente} * B}{\%Al_2O_3 \text{ suelo}}$$

A partir de el parámetro C fue posible estimar el % de pérdida o ganancia del elemento D , de acuerdo con la ecuación:

$$D = \frac{100 * C}{A} - 100$$

Finalmente, fue posible establecer un *%Pérdida global* durante la generación de cada horizonte en comparación al estrato madre del perfil:

$$\%Pérdida \text{ global} = 100 - (\Sigma C - \%H_2O \text{ remanente})$$

Este esquema de análisis fue aplicado a los cuatro perfiles bajo estudio, generando las [Tablas 5.1 a 5.14](#). De esta forma, un valor positivo en la columna D implica la acumulación del elemento, mientras que un signo negativo representa una movilización hacia el agua. Valores positivos de *%Pérdida global* implican separación del elemento del sistema suelo, mientras que magnitudes negativas indican acumulación.

Es importante destacar que en este ejercicio pocos casos mostraron *%Pérdida global* positiva, generalmente asociada a movilidad de Mg, Na y K hacia el agua. En la mayor parte de los casos se observaron valores negativos de *%Pérdida global*, lo que implica una ganancia de materia durante la pedogénesis ([Figura 5.8a](#)). Este fenómeno ha sido más evidente, en general, con el descenso topográfico ([Figura 5.8b](#)).

Para interpretar estos resultados, es importante considerar la composición de la roca madre, las condiciones ambientales y los procesos de alteración dominantes en la región. En los cuatro perfiles de suelo bajo estudio, la roca madre consiste en intercalaciones de estratos delgados de lutita-marga, que forman parte de la Formación Méndez (Cretácico Superior) ([Goldhammer, 1999](#)). De acuerdo con el análisis de difracción de rayos-X, estas rocas están constituidas en general por cuarzo + calcita + albita + illita ± montmorillonita ± clorita. Como ya se ha mencionado, en la Región Citrícola domina un clima cálido, sub-húmedo a húmedo (A[C]) de acuerdo con la clasificación de Köppen ([García, 1973](#)), con una temperatura anual promedio de 22°C, con valores extremos de -10°C en invierno y de 45°C en verano ([Ledesma-Ruiz et al., 2015](#)). Esto implica condiciones episódicas de precipitación-evaporación en la región.

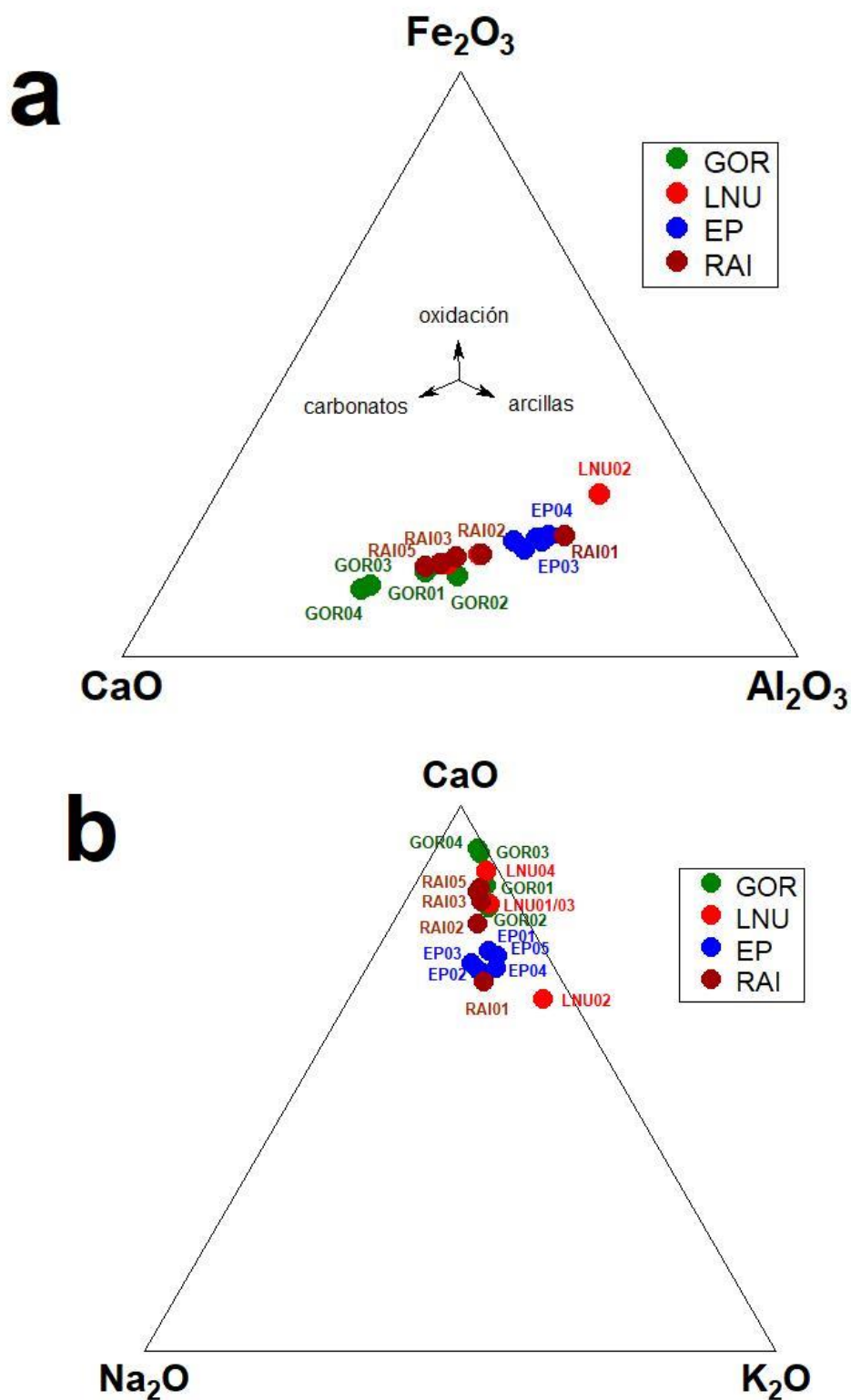


Figura 5.6: (a) Diagrama ternario $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3$ y (b) Diagrama ternario $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.

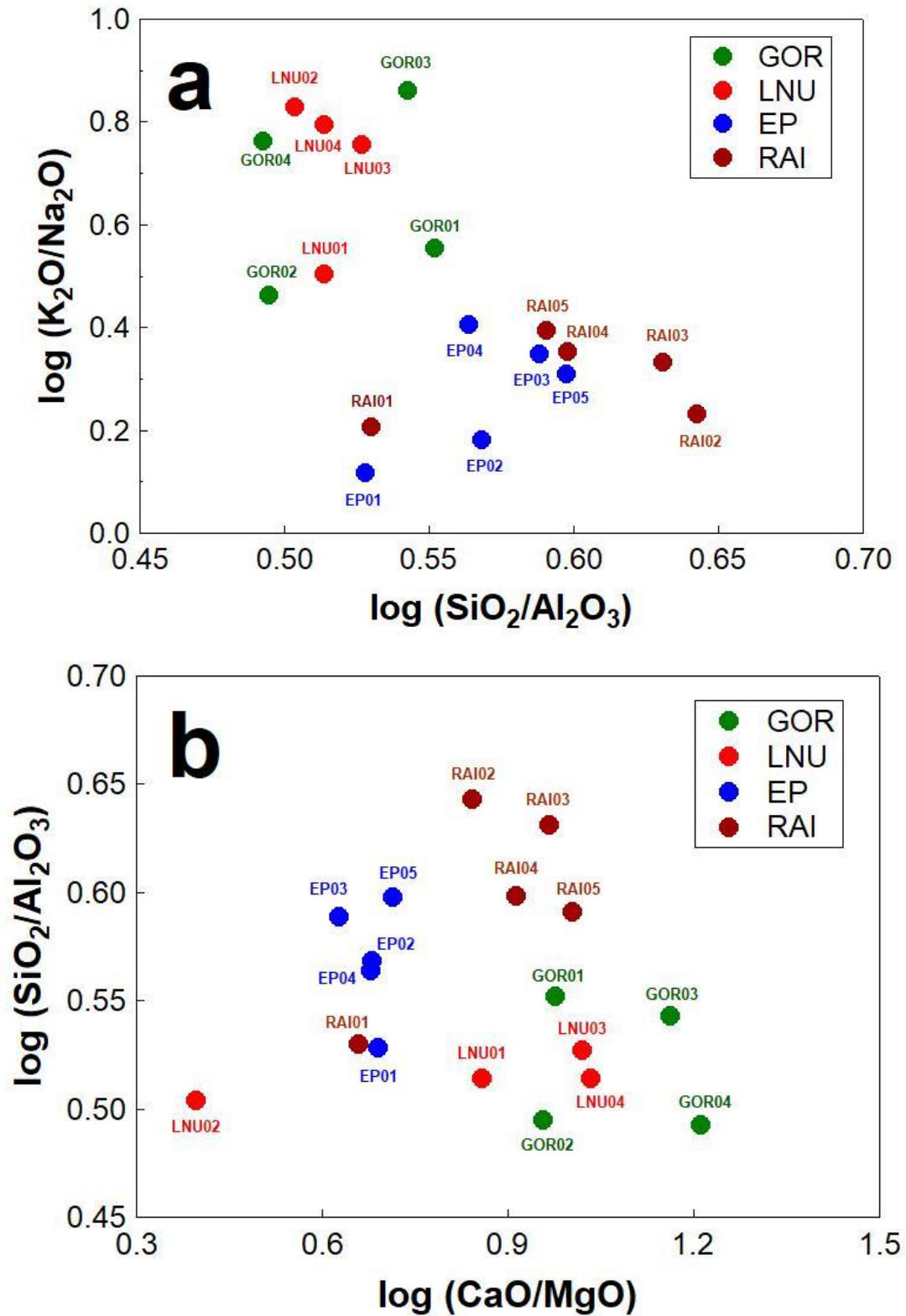


Figura 5.7: Variación de las relaciones (a) $K_2O/Na_2O - SiO_2/Al_2O_3$ y (b) $SiO_2/Al_2O_3 - CaO/MgO$ para los perfiles de suelo incluidos en el presente estudio: (a) GO: La Gorgonia, (b) NU: La Nutria, (c) EP: El Poblado y (d) RA: Raíces.

Tabla 5.1: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L. (GOR01 → GOR02).

Elemento	A_GOR-01	B_GOR-02	C_GOR-02	D_GOR-02
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/Ganancia
SiO ₂	45.39	45.37	39.8	-12.4
TiO ₂	0.57	0.60	0.5	-7.7
Al ₂ O ₃	12.73	14.52	12.7	0.0
Fe ₂ O ₃	4.89	4.64	4.1	-16.8
MnO	0.069	0.062	0.1	-21.2
MgO	1.70	1.63	1.4	-15.9
CaO	16.09	14.78	13.0	-19.5
Na ₂ O	0.61	0.87	0.8	25.0
K ₂ O	2.18	2.53	2.2	1.7
P ₂ O ₅	0.115	0.131	0.1	-0.1
PPI	16.24	15.51	13.6	-16.3
H ₂ O ⁻	0.37	0.27	0.2	-36.0
Suma	100.584	100.643	88.3	
%Pérdida global	11.5			

Tabla 5.2: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L. (GOR01 → GOR03).

Elemento	A_GOR-01	B_GOR-03	C_GOR-03	D_GOR-03
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/Ganancia
SiO ₂	45.39	39.21	44.4	-2.2
TiO ₂	0.57	0.51	0.6	1.3
Al ₂ O ₃	12.73	11.24	12.7	0.0
Fe ₂ O ₃	4.89	4.41	5.0	2.1
MnO	0.069	0.07	0.1	14.9
MgO	1.70	1.43	1.6	-4.7
CaO	16.09	20.81	23.6	46.5
Na ₂ O	0.61	0.24	0.3	-55.4
K ₂ O	2.18	1.74	2.0	-9.6
P ₂ O ₅	0.115	0.119	0.1	17.2
PPI	16.24	20.58	23.3	43.5
H ₂ O ⁻	0.37	0.36	0.4	10.2
Suma	100.584	100.359	113.7	
%Pérdida global	-14.1			

Tabla 5.3: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Gorgonia, Linares, N.L. (GOR01 → GOR04).

Elemento	A_GOR-01	B_GOR-04	C_GOR-04	D_GOR-04
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/Ganancia
SiO ₂	45.39	35.51	39.6	-12.8
TiO ₂	0.57	0.48	0.5	-6.1
Al ₂ O ₃	12.73	11.42	12.7	0.0
Fe ₂ O ₃	4.89	4.40	4.9	0.3
MnO	0.069	0.063	0.1	1.8
MgO	1.70	1.39	1.5	-8.9
CaO	16.09	22.66	25.3	57.0
Na ₂ O	0.61	0.29	0.3	-47.0
K ₂ O	2.18	1.68	1.9	-14.1
P ₂ O ₅	0.115	0.098	0.1	-5.0
PPI	16.24	22.40	25.0	53.8
H ₂ O ⁻	0.37	0.43	0.5	29.5
Suma	100.584	100.391	112.3	
%Pérdida global	-12.8			

Tabla 5.4: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L. (LUN01 → LUN02).

Elemento	A_LNU-01	B_LNU-02	C_LNU-02	D_LNU-02
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/Ganancia
SiO ₂	47.77	54.64	46.7	-2.3
TiO ₂	0.67	0.79	0.7	0.7
Al ₂ O ₃	14.63	17.13	14.6	0.0
Fe ₂ O ₃	5.81	8.36	7.1	22.9
MnO	0.141	0.174	0.1	5.4
MgO	1.77	1.85	1.6	-10.7
CaO	12.78	4.62	3.9	-69.1
Na ₂ O	0.67	0.33	0.3	-57.9
K ₂ O	2.14	2.22	1.9	-11.4
P ₂ O ₅	0.132	0.189	0.2	22.3
PPI	14.37	10.30	8.8	-38.8
H ₂ O ⁻	0.25	0.56	0.5	91.3
Suma	100.883	100.603	85.9	
%Pérdida global	13.6			

Tabla 5.5: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L. (LNU01 → LNU03).

Elemento	A_LNU-01	B_LNU-03	C_LNU-03	D_LNU-03
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Perdida/ganancia
SiO ₂	47.77	43.33	49.2	3.0
TiO ₂	0.67	0.61	0.7	3.4
Al ₂ O ₃	14.63	12.88	14.6	0.0
Fe ₂ O ₃	5.81	5.04	5.7	-1.5
MnO	0.141	0.134	0.2	7.9
MgO	1.77	1.33	1.5	-14.6
CaO	12.78	13.95	15.8	24.0
Na ₂ O	0.67	0.29	0.3	-50.8
K ₂ O	2.14	1.65	1.9	-12.4
P ₂ O ₅	0.132	0.130	0.1	11.9
PPI	14.37	20.61	23.4	62.9
H ₂ O ⁻	0.25	0.75	0.9	240.8
Suma	100.883	99.954	113.5	
%Pérdida global	-14.4			

Tabla 5.6: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo La Nutria, Linares, N.L. (LNU01 → LNU04).

Elemento	A_LNU-01	B_LNU-04	C_LNU-04	D_LNU-04
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Perdida/ganancia
SiO ₂	47.77	41.71	47.7	-0.1
TiO ₂	0.67	0.59	0.7	0.0
Al ₂ O ₃	14.63	12.78	14.6	0.0
Fe ₂ O ₃	5.81	5.15	5.9	1.4
MnO	0.141	0.128	0.2	3.5
MgO	1.77	1.34	1.5	-13.6
CaO	12.78	14.47	16.6	29.6
Na ₂ O	0.67	0.27	0.3	-55.2
K ₂ O	2.14	1.68	1.9	-10.3
P ₂ O ₅	0.132	0.132	0.2	13.6
PPI	14.37	21.84	25.0	73.9
H ₂ O ⁻	0.25	0.76	0.9	248.0
Suma	100.883	100.090	114.5	
%Perdida global	-15.4			

Tabla 5.7: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L. (EP01 → EP02).

Elemento	A_EP-01	B_EP-02	C_EP-02	D_EP-02
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/ganancia
SiO ₂	52.19	55.68	57.2	9.7
TiO ₂	0.70	0.66	0.7	-3.1
Al ₂ O ₃	15.47	15.05	15.5	0.0
Fe ₂ O ₃	5.60	5.64	5.8	3.5
MnO	0.132	0.125	0.1	-2.7
MgO	1.96	1.67	1.7	-12.4
CaO	9.60	8.02	8.2	-14.1
Na ₂ O	1.69	1.38	1.4	-16.1
K ₂ O	2.21	2.09	2.1	-2.8
P ₂ O ₅	0.131	0.109	0.1	-14.5
PPI	11.20	10.24	10.5	-6.0
H ₂ O ⁻	0.14	0.19	0.2	39.5
Suma	100.883	100.664	103.5	
%Pérdida global	-4.7			

Tabla 5.8: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L. (EP01 → EP03).

Elemento	A_EP-01	B_EP-03	C_EP-03	D_EP-03
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/ganancia
SiO ₂	52.19	56.67	60.0	14.9
TiO ₂	0.70	0.70	0.7	5.8
Al ₂ O ₃	15.47	14.62	15.5	0.0
Fe ₂ O ₃	5.60	5.69	6.0	7.5
MnO	0.132	0.096	0.1	-23.0
MgO	1.96	1.73	1.8	-6.6
CaO	9.60	7.34	7.8	-19.1
Na ₂ O	1.69	0.97	1.0	-39.3
K ₂ O	2.21	2.16	2.3	3.4
P ₂ O ₅	0.131	0.106	0.1	-14.4
PPI	11.20	10.45	11.1	1.3
H ₂ O ⁻	0.14	0.52	0.6	293.0
Suma	100.883	100.532	106.3	
%Pérdida global	-6.9			

Tabla 5.9: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L. (EP01 → EP04).

Elemento	A_EP-01	B_EP-04	C_EP-04	D_EP-04
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/ganancia
SiO ₂	52.19	49.06	56.7	8.6
TiO ₂	0.70	0.62	0.7	2.3
Al ₂ O ₃	15.47	13.39	15.5	0.0
Fe ₂ O ₃	5.60	5.28	6.1	8.9
MnO	0.132	0.114	0.1	-0.2
MgO	1.96	1.56	1.8	-8.0
CaO	9.60	7.45	8.6	-10.3
Na ₂ O	1.69	0.80	0.9	-45.3
K ₂ O	2.21	2.03	2.3	6.1
P ₂ O ₅	0.131	0.115	0.1	1.4
PPI	11.20	20.29	23.4	109.3
H ₂ O ⁻	0.14	0.52	0.6	329.1
Suma	100.883	100.709	116.3	
%Pérdida global	-16.9			

Tabla 5.10: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo El Poblado, Linares, N.L. (EP01 → EP05).

Elemento	A_EP-01	B_EP-05	C_EP-05	D_EP-05
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/ganancia
SiO ₂	52.19	54.85	61.2	17.3
TiO ₂	0.70	0.65	0.7	3.6
Al ₂ O ₃	15.47	13.86	15.5	0.0
Fe ₂ O ₃	5.60	5.64	6.3	12.4
MnO	0.132	0.091	0.1	-23.1
MgO	1.96	1.78	2.0	1.4
CaO	9.60	9.23	10.3	7.3
Na ₂ O	1.69	1.10	1.2	-27.4
K ₂ O	2.21	2.24	2.5	13.1
P ₂ O ₅	0.131	0.140	0.2	19.3
PPI	11.20	11.32	12.6	12.8
H ₂ O ⁻	0.14	0.41	0.5	226.9
Suma	100.883	100.901	113.1	
%Pérdida global	-13.6			

Tabla 5.11: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L. (RAI01 → RAI02).

Elemento	A_RAI-01	B_RAI-02	C_RAI-02	D_RAI-02
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/ganancia
SiO ₂	54.98	54.75	71.3	29.7
TiO ₂	0.73	0.64	0.8	14.2
Al ₂ O ₃	16.23	12.46	16.2	0.0
Fe ₂ O ₃	6.08	4.91	6.4	5.2
MnO	0.073	0.102	0.1	82.0
MgO	1.55	1.53	2.0	28.6
CaO	7.08	10.67	13.9	96.3
Na ₂ O	1.30	1.10	1.4	10.0
K ₂ O	2.09	1.87	2.4	16.5
P ₂ O ₅	0.121	0.119	0.2	28.1
PPI	10.05	12.57	16.4	62.9
H ₂ O ⁻	0.33	0.44	0.6	73.7
Suma	100.284	100.721	131.2	
%Pérdida global	-31.8			

Tabla 5.12: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L. (RAI01 → RAI03).

Elemento	A_RAI-01	B_RAI-03	C_RAI-03	D_RAI-03
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/ganancia
SiO ₂	54.98	50.41	69.4	26.2
TiO ₂	0.73	0.60	0.8	13.1
Al ₂ O ₃	16.23	11.79	16.2	0.0
Fe ₂ O ₃	6.08	4.75	6.5	7.5
MnO	0.073	0.101	0.1	90.5
MgO	1.55	1.46	2.0	29.7
CaO	7.08	13.53	18.6	163.1
Na ₂ O	1.30	0.81	1.1	-14.2
K ₂ O	2.09	1.74	2.4	14.6
P ₂ O ₅	0.121	0.115	0.2	30.8
PPI	10.05	14.80	20.4	102.7
H ₂ O ⁻	0.33	0.43	0.6	79.4
Suma	100.284	100.106	137.8	
%Pérdida global	-38.4			

Tabla 5.13: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L. (RAI01 → RAI04).

Elemento	A_RAI-01	B_RAI-04	C_RAI-04	D_RAI-04
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/ganancia
SiO ₂	54.98	49.31	64.3	17.0
TiO ₂	0.73	0.57	0.7	1.9
Al ₂ O ₃	16.23	12.44	16.2	0.0
Fe ₂ O ₃	6.08	5.17	6.7	10.9
MnO	0.073	0.109	0.1	94.8
MgO	1.55	1.56	2.0	31.3
CaO	7.08	12.78	16.7	135.5
Na ₂ O	1.30	0.84	1.1	-15.7
K ₂ O	2.09	1.89	2.5	18.0
P ₂ O ₅	0.121	0.140	0.2	51.0
PPI	10.05	15.73	20.5	104.2
H ₂ O ⁺	0.33	0.47	0.6	85.8
Suma	100.284	100.539	131.2	
%Pérdida global	-31.8			

Tabla 5.14: Evaluación de movilidad de elementos mayores durante la pedogénesis en el perfil de suelo Las Raíces, Linares, N.L. (RAI01 → RAI05).

Elemento	A_RAI-01	B_RAI-05	C_RAI-05	D_RAI-05
%Peso	Roca original	Roca alterada	Remanente	%Pérdida/ganancia
SiO ₂	54.98	46.22	63.3	15.0
TiO ₂	0.73	0.55	0.8	3.1
Al ₂ O ₃	16.23	11.86	16.2	0.0
Fe ₂ O ₃	6.08	4.90	6.7	10.3
MnO	0.073	0.104	0.1	95.0
MgO	1.55	1.49	2.0	31.5
CaO	7.08	15.08	20.6	191.5
Na ₂ O	1.30	0.77	1.1	-18.9
K ₂ O	2.09	1.91	2.6	25.1
P ₂ O ₅	0.121	0.145	0.2	64.0
PPI	10.05	17.66	24.2	140.5
H ₂ O ⁺	0.33	0.39	0.5	61.7
Suma	100.284	100.689	137.8	
%Pérdida global	-38.3			

Se ha reportado que los principales mecanismos de alteración química de rocas incluyen: (a) disolución, (b) hidratación, (c) hidrólisis y ataque ácido y (d) óxido reducción (Zapata Hernández, 2002). En términos generales, estos fenómenos provocan una acumulación progresiva de cuarzo y óxi-hidróxidos de hierro y aluminio junto a minerales arcillosos. Sin embargo, en regiones con suelos carbonatados se produce una lixiviación particular denominada *decarbonatación*, la cual representa la movilización de los carbonatos, que se disuelven como bicarbonatos solubles en el agua de percolación. El fenómeno es acompañado por un proceso inverso en el que los bicarbonatos pasan nuevamente a carbonatos insolubles. Esto se traduce en una acumulación de carbonatos y de CaO en los horizontes de suelo (Figura 5.8b).

Por otra parte, los suelos de la Región Citrícola pueden experimentar el proceso de *iluvación* de arcilla, el cual representa la migración mecánica de la arcilla de los horizontes superficiales a los profundos del perfil arrastrados por agua de infiltración.

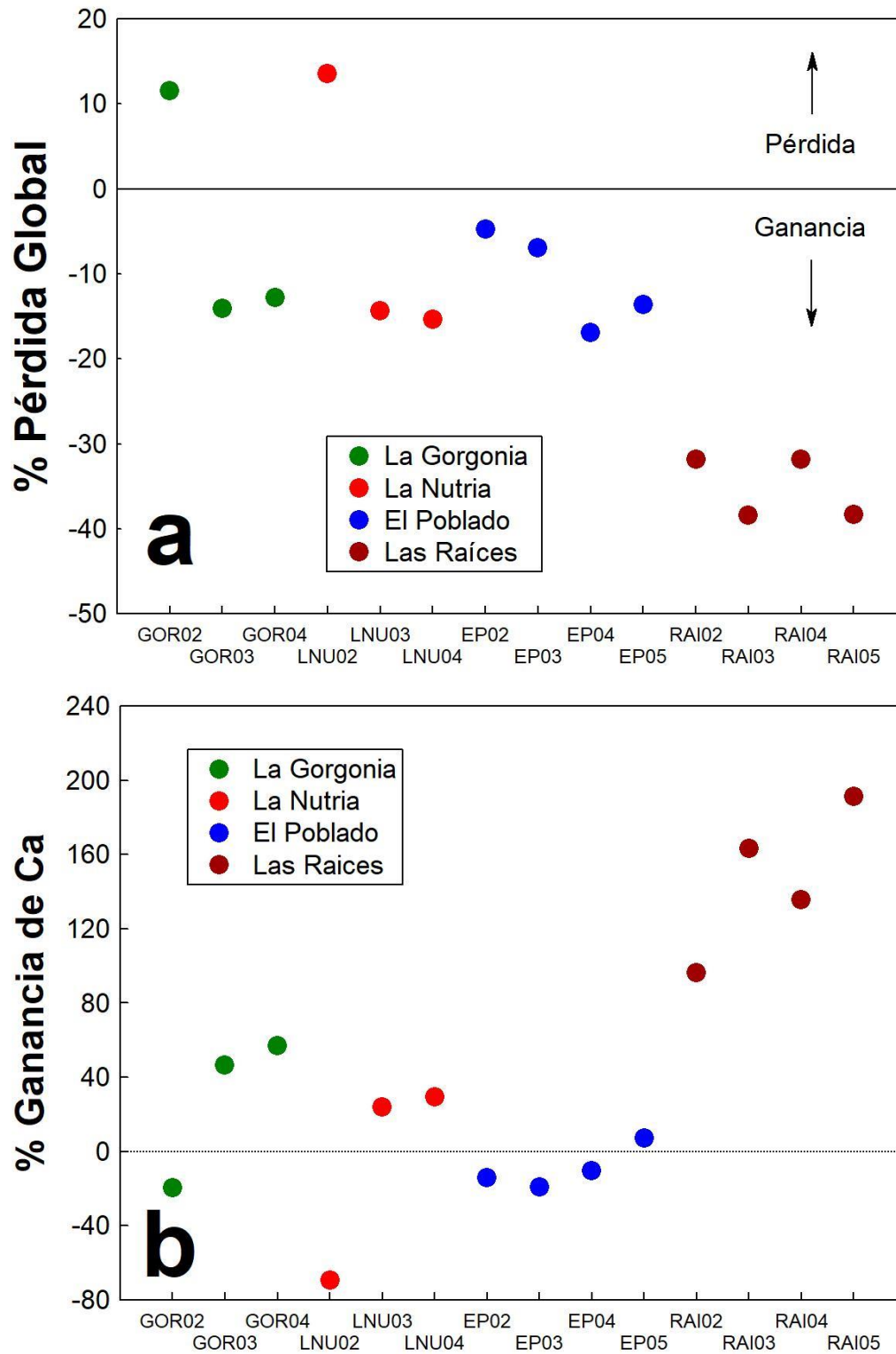


Figura 5.8: (a) Porcentaje de pérdida global de elementos mayores y (b) Porcentaje de ganancia de Ca durante el desarrollo de perfiles de suelo de la Región Citrícola: GOR = La Gorgonia, LNU = La Nutria, EP = El Poblado y RAI = Las Raíces. Cálculos de acuerdo con el modelo de Faure (1997) y considerando al Al_2O_3 como una especie inmóvil.

Por otra parte, la movilidad de elementos traza en una estructura de suelo depende de (Carrillo-González et al., 2006): (a) el pH, con un mayor efecto hacia condiciones ácidas, (b) el tipo y contenido de minerales de arcilla, que pueden retener diferencialmente elementos, (c) los constituyentes de origen orgánico (humus) con capacidad quelante y (d) la presencia de óxido-hidróxidos de Al y Fe que pueden actuar como medio de retención de algunos elementos.

En las Figuras 5.9-5.12 se reportan diagramas de relación química para visualizar este fenómeno en la Región Citrícola. En este ejercicio se han incluido diferentes tipos de elementos traza (White, 2013): (a) LILE (*large ion lithophile elements*): elementos litófilos de tamaño iónico grande (Li, Rb, Sr, Cs, Ba) que se caracterizan por mostrar cargas pequeñas (+1, +2) y radios iónicos relativamente grandes; (b) REE (*rare earth elements*): elementos del grupo de los lantánidos (La-Lu y el Y) que se caracterizan en general por carga +3 y radios iónicos medianos; (c) HFSE (*high field strength elements*): elementos de campo electrostático fuerte (Zr, Nb, Hf, Ta, Th) que presentan cargas altas (+4, +5) y radios iónicos pequeños; (d) SV (*semi-volatile*): elementos de volatilidad media (Be, B, Ga, Sn, Tl, Pb); (e) 1°ST (*first metal transition serie*): metales de la primera serie de transición (Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu) y (f) 2°ST (*second metal transition serie*): metales de la segunda serie de transición (W). En estos diagramas se incluye el parámetro de movilidad $D_i = (TiO_2/C_i)_{HX} / (TiO_2/C_i)_{H1}$ en donde C_i representa la concentración del elemento i en la roca madre $H1$ y en los horizontes HX (2 a 5) que le sobre yacen. Se considera al TiO_2 como un elemento inmóvil en el sistema edafológico. De esta forma, un valor < 1.0 implicaría la retención del elemento, mientras que uno > 1.0 indica su movilidad durante el desarrollo del perfil de suelo.

En el perfil de La Gorgonia (GOR01→ GOR04; Figura 5.9) se ha observado movilidad ($D_i < 1.4$) para algunas especies del grupo LILE (especialmente el Sr), del bloque de semi-volátiles (B y Pb) y metales de tipo 1°ST (especialmente el Cu). Es importante recordar que el proceso de acumulación de carbonatos y de arcillas (especialmente illita) en condiciones básicas. Besoain (1985) señaló que en climas áridos y semi-áridos los suelos tienden a acumular carbonatos. Además, condiciones básicas de pH y disponibilidad de K y Ca favorecerían la formación de illita. El enriquecimiento en Sr, B y Pb puede ser reflejo de su afinidad a carbonatos de calcio (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007). Rybicka et al. (1995) reportaron además una alta capacidad de retención de metales $Pb > Cd \approx Cu > Ni > Zn$ en illita-montmorillonita.

Cabe señalar que los horizontes del perfil La Gorgonia presentan una concentración en Sr de 326-458 ppm (Tabla 4.2), intervalo dentro de lo que se ha reportado para suelos franco-limosos (20-1000 ppm; Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007). En el caso del B, los horizontes GOR cubren el intervalo 20-35 ppm (Tabla 4.2), de nueva cuenta comparable a lo reportado en suelos franco-limosos (15-35 ppm). Sin embargo, la concentración de Pb en los horizontes GOR es baja (8.3-11.7 ppm; Tabla 4.2) en comparación a lo observado en suelos franco-limosos (10-50 ppm). Es importante mencionar que el Pb no tiene una función biológica conocida y por el contrario se le considera un elemento de alta toxicidad (Carrillo-González et al., 2006).

Aunque la acumulación de Cu en La Gorgonia no se ve favorecida por la presencia de carbonatos y un pH ligeramente básico (con concentración de 20-30 ppm; Tabla 4.2), la presencia de illita podría derivar en una retención moderada (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007). En suelos franco-limosos se ha reportado una concentración de Cu de 4-100 ppm. Por otra parte, la inmovilidad de los lantánidos (REE) se ha evidenciado también en los diagramas normalizados a condrita (Figura 5.13a), en donde se observa una sobreposición de patrones asociados a los diferentes horizontes del perfil.

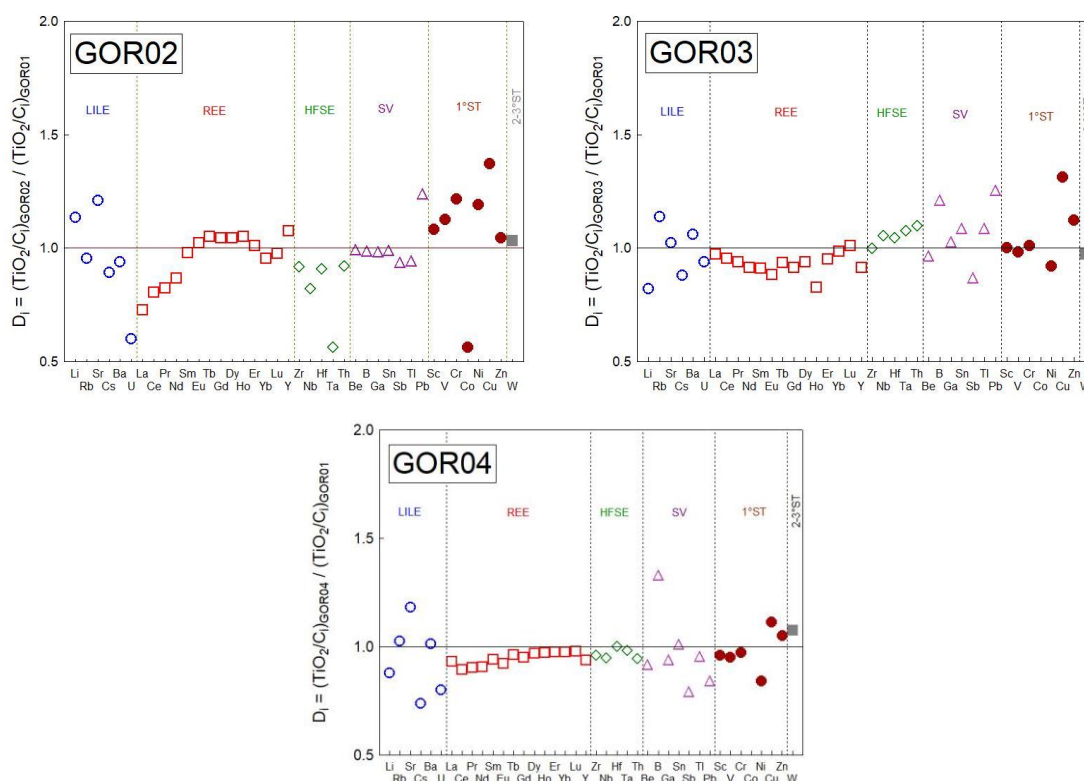


Figura 5.9: Diagrama de parámetro de movilidad $D_i = (TiO_2/C_i)_{HX} / (TiO_2/C_i)_{H1}$ para el perfil de suelo La Gorgonia (GOR), donde C_i representa la concentración del elemento traza i en la roca madre $H1$ y en los horizontes HX (2 a 4) que le sobreyacen. Grupos de elementos traza: (a) LILE, (b) REE, (c) HFSE, (d) SV, (e) 1°ST y (f) 2°ST.

En general, la movilidad de elementos traza ($D_i < 5.0$) en el perfil La Nutria (LNU1→LNU4; **Figura 5.10**) es limitada a pocos casos. Estos incluyen al Rb y Sr (LILE), Ta (HFSE) y al B (SV). Como ya se ha mencionado, los casos de Rb, Sr y B estarían relacionados a la acumulación de calcita en un ambiente de pH neutro a ligeramente básico. Adicionalmente, la acumulación de B se ha asociado a incremento en materia orgánica. Cabe señalar que los horizontes LNU son los que muestran mayor contenido de materia orgánica (0.6 – 6.1%; **Tabla 4.3**).

La composición en Rb (73-89 ppm), Sr (94-375 ppm) y B (7-45 ppm) en los horizontes de La Nutria (**Tabla 4.4**) es semejante a la registrada en suelos franco – limosos (Rb = 100-120 ppm, Sr = 20-1000 ppm, B = 15-35 ppm; **Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007**). Por otra parte, el Ta es un elemento generalmente inmóvil durante el intemperismo, acumulándose en illita y caolinita (**Filella, 2017**). El proceso de iluviación que ocurre en la región favorece la acumulación de fracción arcillosa. Los niveles de Ta en el perfil La Nutria son de 0.7-1.1 ppm (**Tabla 4.4**), comparables a los reportados en suelos franco – limosos (1- 2 ppm).

Al igual que en el perfil anterior, los lantánidos en los horizontes LNU se caracterizan por una inmovilidad que da por resultado patrones normalizados muy similares (**Figura 5.13b**).

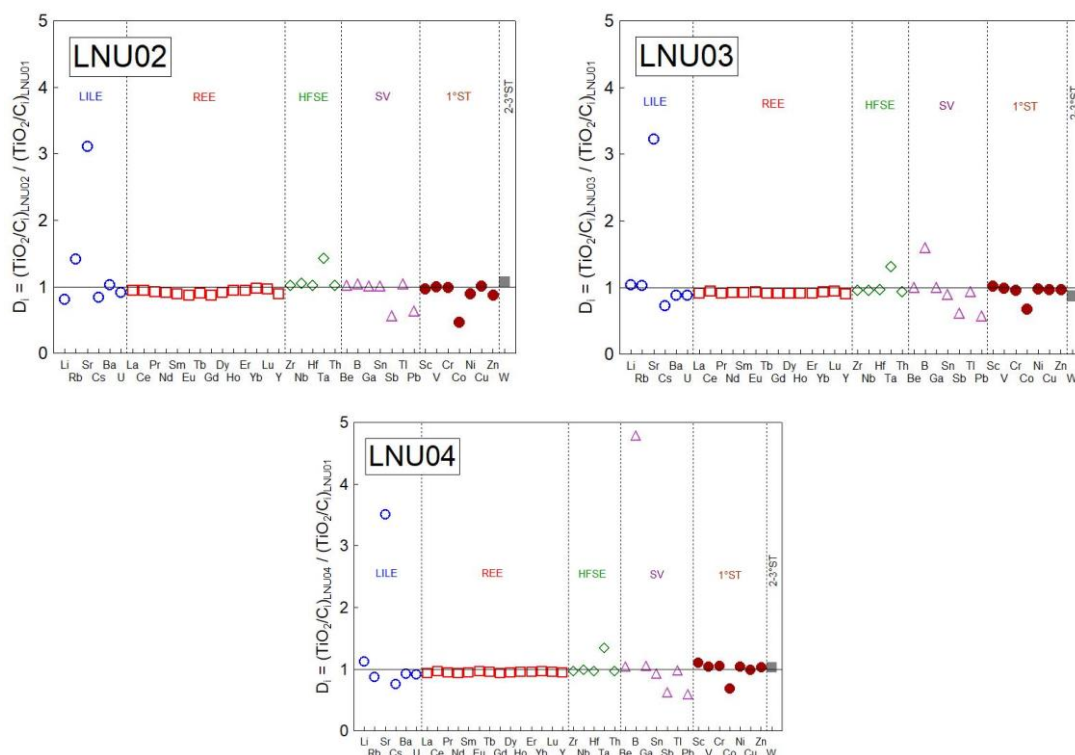


Figura 5.10: Diagrama de parámetro de movilidad $D_i = (TiO_2/C_i)_{HX} / (TiO_2/C_i)_{H1}$ para el perfil de suelo La Nutria (LNU), donde C_i representa la concentración del elemento traza i en la roca madre $H1$ y en los horizontes HX (2 a 4) que le sobreyacen.

Para el caso del perfil El Poblado (EP01→EP05; **Figura 5.11**), la movilidad de elementos traza está restringida a Sr (LILE), B y Pb (SV) y Co (1°ST) con valores de $D_i < 1.7$. Los horizontes de este perfil (**Tabla 4.6**) se caracterizan por concentraciones de Sr = 169-315 ppm, B = 27-46 ppm y Pb = 13-18 ppm comparables con las reportadas en suelos franco-limosos (Sr = 20-1000 ppm, B = 15-35 ppm, Pb = 10-50 ppm; **Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007**).

El Co presenta concentraciones de 10-4 ppm en los horizontes EP (**Tabla 4.6**), ligeramente superior a lo reportado para suelos franco-limosos (7.0 ppm; **Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007**). Se ha reportado que la presencia de óxidos favorece su retención. El resto de los elementos traza, incluyendo los lantánidos presentan una movilidad restringida (**Figura 5.13c**).

Con excepción del B ($D_i < 3$), no existe evidencia de una movilidad marcada durante el desarrollo de los horizontes del perfil Las Raíces (RAI01→RAI05; **Figura 5.12**). Una combinación de carbonatos (4-22%) y materia orgánica (0.5-2.5%) (**Tabla 4.7**) podría favorecer la acumulación de este elemento, que muestra concentraciones de 15.1 – 54.0 ppm en los horizontes RAI (**Tabla 4.8**). Estos valores son similares o superiores al intervalo reportado para suelos franco-limosos (15-35 ppm; **Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007**). La inmovilidad se refleja, por ejemplo, en los patrones normalizados de REE muy similares (**Figura 5.13d**).

En conclusión, el ejercicio de evaluación sobre movilidad ha revelado que la concentración de elementos traza en los suelos de la Región Citrícola se ve fuertemente regulada por la acumulación de carbonatos (calcita) y arcillas (illita y montmorillonita), además de horizontes limitados de materia orgánica.

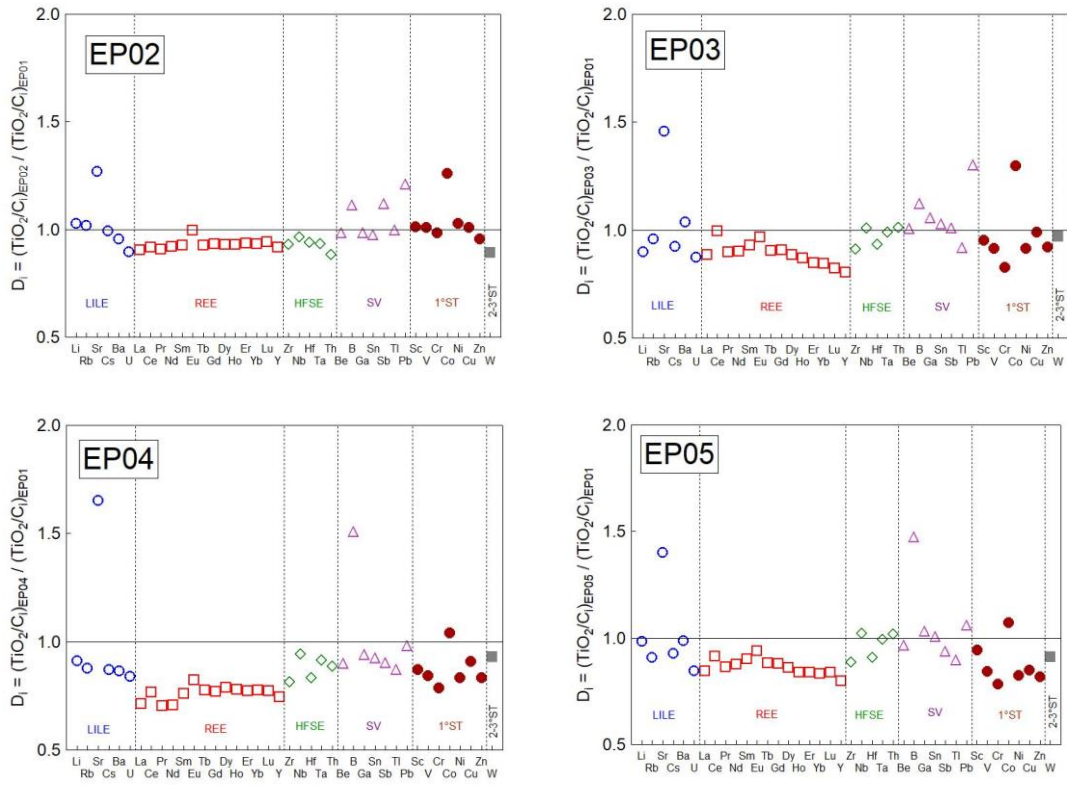


Figura 5.11: Diagrama de parámetro de movilidad $D_i = (TiO_2/C_i)_{HX} / (TiO_2/C_i)_{H1}$ para el perfil de suelo El Poblado (EP), donde C_i representa la concentración del elemento traza i en la roca madre $H1$ y en los horizontes HX (2 a 5) que le sobreyacen.

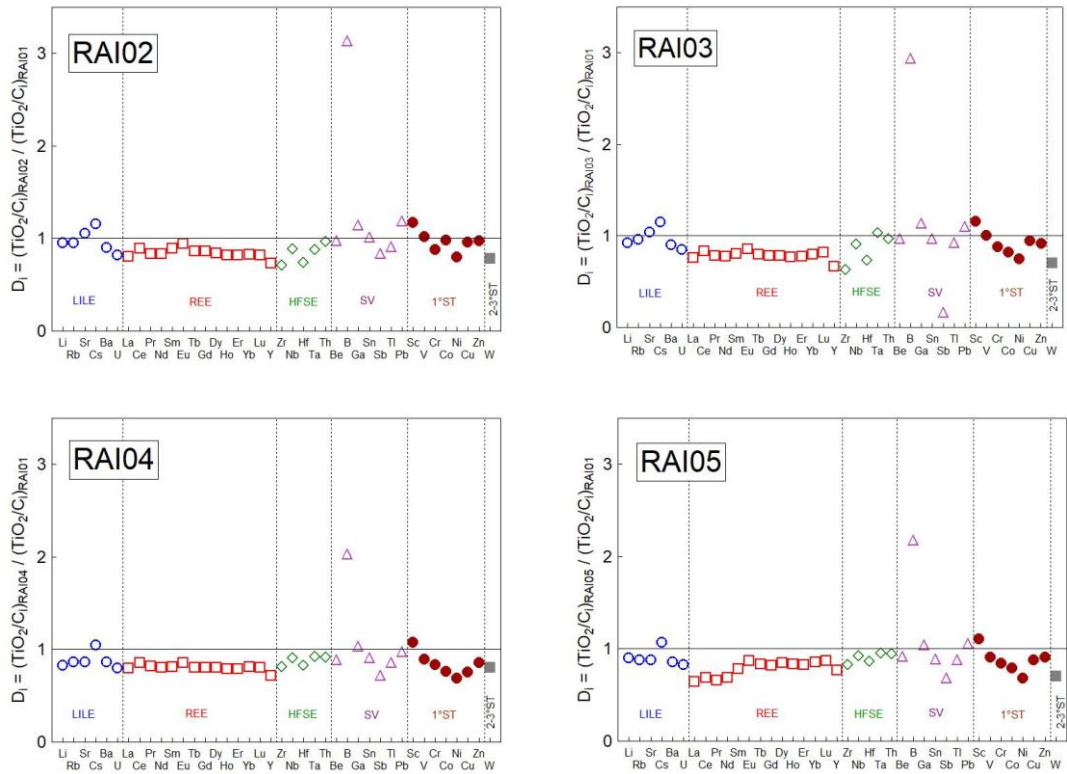


Figura 5.12 Diagrama de parámetro de movilidad $D_i = (TiO_2/C_i)_{HX} / (TiO_2/C_i)_{H1}$ para el perfil de suelo Las Raíces (RAI), donde C_i representa la concentración del elemento traza i en la roca madre $H1$ y en los horizontes HX (2 a 5) que le sobreyacen.

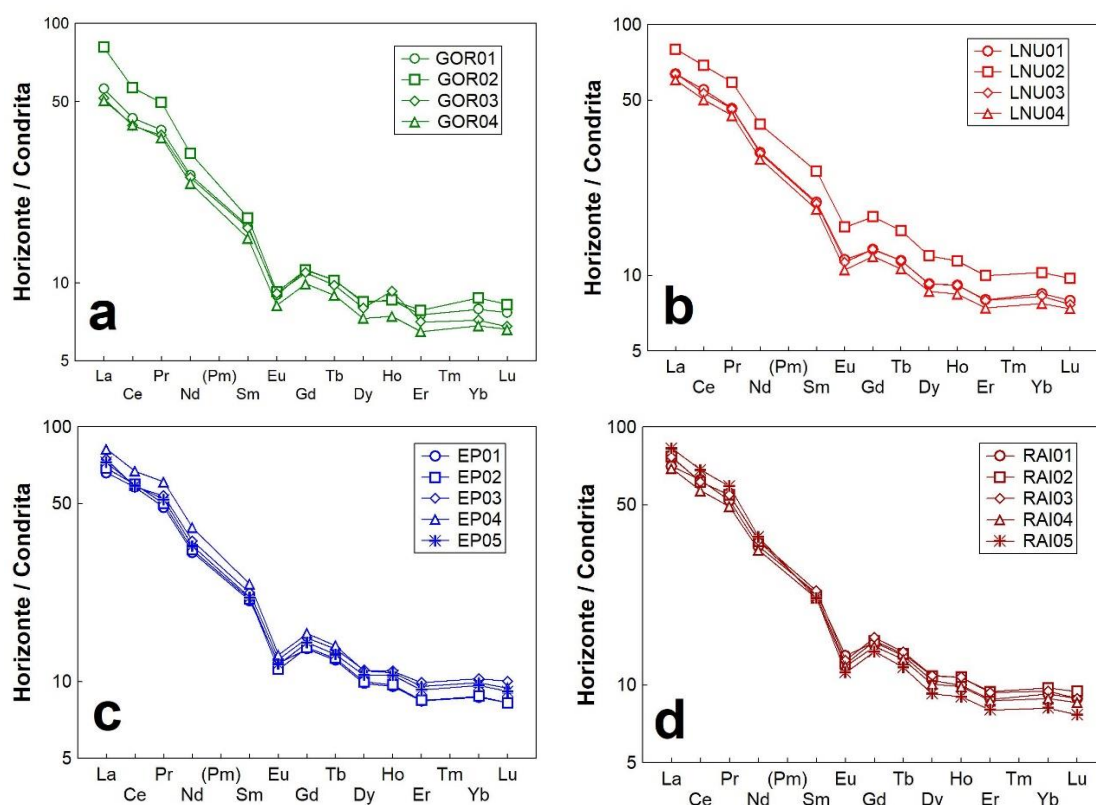


Figura 5.13: Patrones de lantánidos normalizados a condrita para los horizontes de suelo de los perfiles (a) La Gorgonia, (b) La Nutria, (c) El Poblado y (d) Las Raíces.

5.4 Referencias

- Besoain, E. 1985.** Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica, 1216 p.
- Carillo-González, R., Simunek, J., Sauve, S., Adriano, D. 2006.** Mechanisms and pathways of trace element mobility in soils. *Advances in Agronomy* 91, 111-178.
- Faure, G. 1997.** Principles and applications of geochemistry. Pearson, Londres, 624 p.
- Filella, M. 2017.** Tantalum in the environment. *Earth Science Reviews* 173, 122-140.
- García, E. 1973.** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 3a. Edición, Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F., 252 p.
- Goldhammer, R.K. 1999.** Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico. En: Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F. (eds.), Mesozoic sedimentary and tectonic history of north-central Mexico. *Geological Society of America Special Paper* 340, 1-58.
- INEGI, 2025.** Carta edafológica Escala 1:250 000 Serie III G1411 (Tamaulipas, Nuevo León).
- Kabata-Pendias, A., Mukherjee, A. 2007.** Trace elements from soil to humans. Springer, Berlin 550 p.

- Ledesma-Ruiz, R., Pastén-Zapata, E., Parra, R., Harter, T., Mählknecht, J. 2015.** Investigation of the geochemical evolution of groundwater under agricultural land: A case study in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology* **521**, 410-423.
- Loera García, J.F. 2016.** Estudio mineralógico y geoquímico del sistema roca-suelo-vegetación en el transecto Montemorelos-Rayones, Nuevo León. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.
- Molina, E. 2000.** Nutrición y fertilización de la naranja. *Informaciones agronómicas* **40**, 5-11.
- Ovalle, R., Seguel, O., Pfeiffer, M. 2023.** Génesis y ocurrencia de carbonatos en los suelos. *Agro Sur* **51**, 1-17.
- Pereira, P., Brevik, E.C., Muñoz-Rojas, M., Miller, B.A. 2017.** Soil Mapping and Process Modeling for Sustainable Land Use Management. Elsevier, DOI: 10.1016/C2015-0-04597-X.
- Peoples, M.B., Richardson, A.E., Simpson, R.J., Fillery, I.R.P. 2014.** Soil: Nutrient Cycling. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, p. 197-210.
- Platas Castillo, E. 2016.** Estudio mineralógico y geoquímico de la interacción de los sistemas roca-suelo-vegetación en el transecto Linares-La Ascensión, Nuevo León. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.
- Rybicka, E.H., Calmano, W., Breger, A. 1995.** Heavy metals sorption/desorption on competing clay minerals and experimental study. *Applied Clay Science* **9**, 369-381.
- Simon, M., Peralta, N., Costa, J.L. 2013.** Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencia del Suelo* **31**, 45-55.
- Trinidad-Santos, A., Velasco-Velasco, J. 2016.** Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad* **9**, 52-58.
- White, W.M. 2013.** Geochemistry. Wiley-Blackwell, 960 p.
- Zapata-Hernández, R.D. 2002.** Química de los procesos patogenéticos del suelo. Escuela de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 282 p.

CONCLUSIONES

- Se efectuó el análisis fisicoquímico, mineralógico y geoquímico para cuatro perfiles de suelo en el área Linares, dentro de la Región Citrícola de Nuevo León.
- De acuerdo con las características de sus horizontes, los perfiles se han clasificado como leptosol La Gorgonia (GOR), vertisol La Nutria (LNU), cambisol/Fluvisol El Poblado (EP) y leptosol/Fluvisol Las Raíces (RAI) en un arreglo descendente de altitud. Todos los perfiles incluyen como roca madre a lutita de la Formación Méndez, una litología constituida por microcristales de cuarzo y albita embebidos en una matriz fina de calcita y minerales arcillosos, principalmente illita y clorita.
- La mayoría de los horizontes muestra una textura de tipo franco arcillosa, con valores de pH neutros a ligeramente básicos (7.4 a 8.2) y conductividad eléctrica en el intervalo de 60 a 1850 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La materia orgánica es relativamente escasa, con contenidos que cubren de 0.16 a 6.07%. La mineralogía de los estratos es similar a la observada en la roca madre (cuarzo + albita + calcita + illita + clorita $\pm$ montmorillonita), pero es evidente una acumulación de carbonatos (4.0 – 25.0%) durante el desarrollo de los perfiles.
- La concentración en elementos mayores y traza es comparable a los intervalos reportados en la literatura para suelos franco-arcillosos. La evaluación de movilidad de elementos mayores, considerando al Al_2O_3 como un elemento inmóvil, indica en la mayoría de los casos una ganancia de materia, en lugar de pérdidas, durante la pedogénesis. Este fenómeno puede asociarse a la acumulación de carbonatos y de arcillas en condiciones de clima cálido subhúmedo a húmedo.
- La movilidad de elementos traza, considerando al TiO_2 como inmóvil, se encuentra restringida a algunos elementos, que incluyen principalmente el Sr, B, Pb y Cu, la cual es controlada por la acumulación de carbonato y arcillas.
- El estudio ha revelado diversas condiciones ligadas al desarrollo edafológico en la región y que explican un ambiente favorable para el cultivo de cítricos.