

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“CARACTERIZACIÓN, CLASIFICACIÓN Y MAPEO DE LOS SUELOS
ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES
ANTIGUOS EN BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA”

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en
Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar al grado y título de Maestría
Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos

EDGAR JESÚS VINDAS QUESADA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2023

DEDICATORIA

A mis abuelos que ya no están, a mi mamá y a mi papá por todo lo que me han dado, siempre han sido mis mejores guías de vida. A mis hermanos, por su apoyo y por estar siempre conmigo.

A Rafael Mata Chinchilla, por darme la oportunidad de ingresar como asistente al Laboratorio de Recursos Naturales, por su confianza para instarme a realizar mis estudios de posgrado en la ciencia del suelo, por todo lo que me ha enseñado y todo lo que he aprendido de él y me ha permitido ser una mejor persona. A Oldemar Vargas Gutiérrez, por todo que me enseñó mientras estuve en el laboratorio, por compartirme sus conocimientos en mecánica y su gusto por los motores. A Pamela Zúñiga Concepción, por su amistad, colaboración y apoyo al realizar esta tesis. A los tres les estaré eternamente agradecido por todos los momentos compartidos y por dejarme formar parte del LRN.

A Carlomagno Salazar Calvo, por toda su confianza y por permitirme iniciar mi vida laboral formando parte del PCS, donde sigo aprendiendo de suelos y a ser un buen profesional.

Y a don Alfredo Alvarado Hernández, aunque no tuve la oportunidad de recibir clases con él, no faltaron momentos para conversar sobre de suelos y contarme sus experiencias de vida.

Pepe 🐾
25/04/2023

AGRADECIMIENTOS

A Rafael Mata Chinchilla, Carlomagno Salazar Calvo y don Alfredo Alvarado Hernández, por formar parte de mi comité asesor de tesis, gracias por su tiempo y compartir sus conocimientos conmigo, son ejemplos a seguir.

Le doy gracias a la Universidad de Costa Rica (UCR) por hacer posible que muchos jóvenes que no cuentan con los recursos económicos necesarios, tengan la oportunidad de realizar estudios universitarios.

Al Sistema de Estudios de Posgrado (SEP) y al Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales (PPCARN), por el financiamiento de parte de los análisis de esta tesis.

Al Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), por impulsar el desarrollo de sector agrícola desde 1955 y por realizar los análisis físicos y químicos de los suelos estudiados.

A Mavis Montero Villalobos y Leonardo Quesada Román de la Unidad de Difracción de Rayos X de la Escuela de Química, por los análisis requeridos para obtener la mineralogía de las arcillas los perfiles de suelo estudiados.

A Andrea Hernández Agüero y Rafael Loáiciga Chavarría del Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas (CIEMIC), por su colaboración con las fotografías microscópicas de las arcillas.

A Jackeline Brenes Durán del Departamento de Información Meteorológica del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), por facilitarme los datos meteorológicos del área de estudio.

A mi amigo y colega Roberto Aguirre Elizondo, por su valiosa amistad y compañerismo durante nuestro paso por la universidad y que aún se mantiene.

Y a mis amigos y compañeros del PCS, con quienes sigo aprendiendo y trabajando con el suelo.

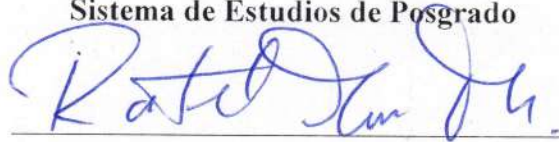
Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos



Dr. Manuel Camacho Umaña

Representante de la Decana

Sistema de Estudios de Posgrado




M. Sc. Rafael Mata Chinchilla

Director de Tesis

No firma por razones de salud

Dr. Alfredo Alvarado Hernández

Asesor



M. Sc. Carlomagno Salazar Calvo


Asesor



Dra. Catalina Salas Durán

Directora

Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales



Edgar Jesús Vindas Quesada

Candidato

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
HOJA DE APROBACIÓN.....	iv
TABLA DE CONTENIDOS	v
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE ANEXOS.....	xviii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xix
CAPÍTULO 1. FACTORES FORMADORES DE LOS SUELOS ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES ANTIGUOS EN BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA.....	1
Introducción	1
Factores formadores del suelo	3
Clima	3
Material parental	7
Relieve (Topografía)	10
Organismos.....	12
Tiempo	14
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos	16
Literatura citada	17
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES ANTIGUOS EN LA ZONA DE BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA.	25
Introducción	25
Metodología	28
Área de estudio.....	28
Trabajo de campo	29
Métodos de laboratorio para análisis de características físicas y químicas de suelo	30

Resultados	32
Descripción morfológica de los perfiles.....	32
Discusión	92
Características morfológicas	92
Características físicas	95
Características químicas	98
Conclusiones	100
Literatura citada	101
CAPÍTULO 3. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA A NIVEL DE SUBGRUPO DE LOS SUELOS ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES ANTIGUOS EN BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA.	113
Introducción	113
Metodología	117
Área de estudio.....	117
Trabajo de campo	117
Métodos de laboratorio para análisis de características físicas y químicas de suelo requeridas para la clasificación taxonómica a nivel de subgrupo	118
Clasificación taxonómica	118
Resultados	119
Discusión	137
Conclusiones.....	142
Literatura citada	143
CAPÍTULO 4. MINERALOGÍA DE ARCILLAS Y CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA A NIVEL DE FAMILIA MINERALÓGICA DE LOS SUELOS ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES ANTIGUOS EN BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA.....	150
Introducción	150
Metodología	164
Área de estudio.....	164
Trabajo de campo	164

Clasificación taxonómica	165
Trabajo de laboratorio	166
Resultados	169
Discusión	187
Conclusiones	194
Literatura citada	195
CAPÍTULO 5. MAPEO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES ANTIGUOS EN BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA.....	206
Introducción	206
Metodología	212
Área de estudio.....	212
Trabajo de campo	212
Clasificación taxonómica	213
Proceso de mapeo.....	213
Resultados	215
Discusión	223
Conclusiones	227
Literatura citada	228
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN GENERAL, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	233
Discusión general.....	233
Conclusiones	237
Recomendaciones	238
Literatura general citada	239
Anexos	274

RESUMEN

Buenos Aires es el cantón número tres de la provincia de Puntarenas, limita al este con Talamanca y Coto Brus, al oeste con Pérez Zeledón, al norte con Talamanca y Pérez Zeledón y al sur con Osa y Coto Brus. Presenta una topografía de relieve plano en la parte baja y quebrado hacia las estribaciones de la Cordillera de Talamanca. El clima dominante es el tropical húmedo-seco muy lluvioso, con dos estaciones climáticas marcadas, una seca de diciembre a abril, y una más lluviosa de mayo a noviembre, lo que resulta en un régimen de humedad ústico, en el que el suelo permanece seco por más de 90 días acumulados en años normales. Presenta diferentes zonas de vida, pero las principales son el Bosque húmedo tropical y Bosque muy húmedo premontano. En términos de hectáreas, la ganadería es la actividad que ocupa mayor área, mientras que la principal actividad económica, así como fuente de desarrollo son las actividades del sector agropecuario como el cultivo de piña. Sus suelos se derivan de sedimentos antiguos depositados en forma de abanicos aluviales que datan de hace unos 12 000 años y que han sido sometidos a largos periodos de meteorización, siendo dominantes los Oxisoles y Ultisoles, que se caracterizan por presentar pH ácidos, baja fertilidad química, buenos contenidos de carbono orgánico y de texturas arcillosas. En esta investigación se analizaron 22 perfiles de suelos, representativos de los diferentes abanicos aluviales y otros materiales geológicos de Buenos Aires, 16 perfiles se clasificaron como Oxisoles, 3 como Ultisoles y 3 como Entisoles, y fueron clasificados hasta nivel de familia mineralógica según la Clave para la Taxonomía de Suelos en su décimo tercera edición. Se logró determinar óxidos de aluminio como gibbsita; óxidos de hierro como goethita y hematita; además de halloysita, los cuales son considerados como minerales no meteorizables, los cuales les confieren baja capacidad de intercambio catiónico, lo que se manifiesta en su escasa fertilidad. Los Entisoles se distribuyen en los ápices de los ríos y a lo largo de sus riberas, se extienden en las partes medias y valles, donde se encuentran los Oxisoles y Ultisoles. La identificación y ubicación de estos suelos es de suma importancia para incorporar acciones de manejo apropiadas según el orden de suelo y tomando en cuenta sus características físicas, químicas y biológicas.

ABSTRACT

Buenos Aires is the canton number three in the province of Puntarenas, bordered to the east by Talamanca and Coto Brus, to the west by Perez Zeledon, to the north by Talamanca and Perez Zeledon and to the south by Osa and Coto Brus. It presents a topography of flat relief in the lower part and broken towards the foothills of the Cordillera de Talamanca. The dominant climate is tropical humid-dry, very rainy, with two marked climatic seasons, a dry one from December to April, and a rainier one from May to November, which results in an ustic humidity regime, in which the soil remains dry for more than 90 cumulative days in normal years. It presents different life zones, but the main ones are the tropical humid forest and the very humid premontane forest. In terms of hectares, cattle raising is the activity that occupies the largest area, while the main economic activity, as well as the source of development, and are the activities of the agricultural sector such as pineapple cultivation. Its soils are derived from ancient sediments deposited in the form of alluvial fans dating back about 12 000 years and which have been subjected to long periods of weathering, with Oxisols and Ultisols being dominant, which are characterized by acidic pH, low chemical fertility, good organic carbon content and clayey textures. In this investigation, 22 soils profiles were analyzed, representative of the different alluvial fans and other geological materials of Buenos Aires, 16 profiles were classified as Oxisols, 2 as Ultisols and 3 as Entisols, and they were classified up to the mineralogical family level according to the Clave for Soil Taxonomy in its thirteenth edition. It was possible to determine aluminum oxides such as gibbsite; iron oxides such as goethite and hematite; in addition to hallousite, which is considered non-weatherable minerals, which give them low cation exchange capacity, which is manifested in their low fertility. The Entisols are distribute at the apex of the rivers and along their banks; they extend in the middle parts and valleys, where the Oxisols and Ultisols are found. The identification and location of these soils is extremely important to incorporate appropriate management actions according to the soil order and taking into account their physical, chemical and biological characteristics.

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P1, P2, P3 y P4.....	61
Cuadro 2.2. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P5, P6, P7 y P8.....	62
Cuadro 2.3. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P9, P10, P11 y P12.....	63
Cuadro 2.4. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P13, P14, P15 y P16.....	64
Cuadro 2.5. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P17, P18, P19 y P20.....	65
Cuadro 2.6. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P21 y P22..	66
Cuadro 2.7. Características químicas obtenidas para los perfiles P1, P2, P3 y P4	76
Cuadro 2.8. Características químicas obtenidas para los perfiles P5, P6, P7 y P8.	77
Cuadro 2.9. Características químicas obtenidas para los perfiles P9, P10, P11 y P12.	78
Cuadro 2.10. Características químicas obtenidas para los perfiles P13, P14, P15 y P16. ..	79
Cuadro 2.12. Características químicas obtenidas para los perfiles P21 y P22.....	81
Cuadro 2.13. Fertilidad disponible en el primer horizonte de los perfiles estudiados.	89
Cuadro 2.14. Fertilidad disponible en el primer horizonte de los perfiles estudiados.	90
Cuadro 2.15. Fertilidad disponible en el primer horizonte de los perfiles estudiados.	91
Cuadro 3.1. Valores de pH en H ₂ O, pH en KCl (1 N) y Δ pH para los perfiles de Guadajara (P7), Convento (P11) y río Cañas (P17), clasificados en el gran grupo de los Acrustox...	131
Cuadro 3.2. Clasificación taxonómica a nivel de subgrupo de los perfiles modales descritos, según los criterios de la taxonomía de suelos del USDA.	136
Cuadro 4.1. Clase de tamaño de partícula de los perfiles modales descritos, según los criterios de la taxonomía de suelos del USDA.	170
Cuadro 4.2. Clase de mineralogía de los perfiles descritos, según los criterios de la taxonomía de suelos del USDA.....	184
Cuadro 4.3. Clasificación taxonómica a nivel de familia mineralógica de los perfiles descritos según los criterios de la taxonomía de suelos del USDA.....	186

Cuadro 5.1. Área (km ²) y porcentaje correspondiente (%) según orden, suborden, gran grupo y subgrupo de los suelos clasificados y mapeados en el área de estudio en Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.	221
Cuadro 5.2. Área (km ²) y porcentaje correspondiente (%) al nivel de familia mineralógica de los suelos clasificados y mapeados en el área de estudio en Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.	222

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Área de estudio Buenos Aires de Puntarenas (hoja cartográfica Buenos Aires, IGN 1980).....	2
Figura 1.2. Terreno con piña establecida y terreno preparado para ser cultivado con piña en Llano Bonito, Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.	3
Figura 1.3. Precipitación promedio (°C) registrada por la estación Planta Volcán, Buenos Aires, entre los años 2014 y 2020 (Fuente: IMN 2022).	5
Figura 1.4. Meses secos en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.....	6
Figura 1.5. Balace hídrico realizado con datos climáticos de la estación Planta Volcán, Buenos Aires, entre los años 2014 y 2020 (Fuente: IMN 2022).	7
Figura 1.6. Campo con rocas monzonitas cuarzosas en Cordoncillo, Buenos Aires de Puntarenas, y detalle del interior y la matriz de la roca.....	10
Figura 1.7. Piñal con un relieve plano a 407 m s. n. m. en la localidad de Santa Marta y la Cola del Dragón con altitudes entre 600 y 1800 m s. n. m., en Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.....	11
Figura 1.8. Zonas de vida de Holdridge presentes en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.	13
Figura 2.1. Área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas, (zona noreste del cantón de Buenos Aires y límite sureste con el cantón Pérez Zeledón), Costa Rica.	28
Figura 2.2. Mapa de ubicación de los perfiles modales realizados en el área de estudio. Fuente: Mapa geológico de la hoja Buenos Aires (Obando y Kussmaul 2009).....	30
Figura 2.3. Perfil San Juancito (P1) clasificado como Humic Rhodic Kandiustox y paisaje correspondiente al cultivo de café en asocio con cedro.	33
Figura 2.4. Perfil Volcán (P2), correspondiente a un Lithic Kandiustox en una finca dedicada a pastos y ganado vacuno.	34
Figura 2.5. Perfil Peje (P3) clasificado como Typic Kandiustox, ubicado en una finca de relieve plano y dedicada al cultivo de yuca.	36
Figura 2.6. Perfil Llano Bonito (P4) clasificado como Lithic Kandiustox, ubicado en terrenos preparados para el cultivo de piña.	37
Figura 2.7. Perfil El Ángel Arriba (P5) clasificado como Vitrandic Ustorthent, y detalle de rocas superficiales y relieve modaradamente ondulado.	38

Figura 2.8. Perfil El Ángel (P6) clasificado como Humic Kandistox y paisaje asociado a su ubicación en el ápice del río Ángel.	40
Figura 2.9. Perfil Guadalajara (P7) correspondiente a un Humic Acrustox y paisaje asociado a su ubicación en la parte media del Abanico río Cañas.	41
Figura 2.10. Perfil Santa María (P8) clasificado como Typic Ustorthents y paisaje asociado a su ubicación en el ápice del río Cañas, en un área de relieve ondulado.	42
Figura 2.11. Perfil Convento (P9) clasificado como Humic Rhodic Acrustox, ubicado en un área cultivada con café y relieve ligeramente ondulado.	43
Figura 2.12. Perfil Buenos Aires (P10) clasificado como Rhodic Kandistox y paisaje asociado a su ubicación, correspondiente a vegetación de sabana con un relieve ligeramente onulado.	45
Figura 2.13. Perfil Cordoncillo (P11) clasificado como Humic Rhodic Kandistox, ubicado en un área cubierta con pastos y árboles de naranja dispersos, de relieve plano o casi plano.	46
Figura 2.14. Perfil río Azul (P12) clasificado como Typic Kandistox y paisaje asociado a su ubicación en un área de relieve ondulado cubierta con pastos y helechos.	47
Figura 2.15. Perfil Puente (P13) clasificado como Typic Kandistox, ubicado en un área de relieve ligeramente ondulado y cubierta con pastos.	49
Figura 2.16. Perfil Sabana La Pelona (P14) clasificado como Rhodic Kandistox y paisaje asociado a su ubicación con relieve moderadamente ondulado y cobertura de pastos.	50
Figura 2.17. Perfil Dúrika (P15) clasificado como Typic Palehumults y paisaje asociado a su ubicación correspondiente a un bosque secundario.	51
Figura 2.18. Perfil Alto Guadalajara (P16) clasificado como Typic Kandistox y paisaje asociado a su ubicación con una cobertura de pasturas para ganadería.	53
Figura 2.19. Perfil río Cañas (P17) clasificado como Rhodic Acrustox, ubicado en la parte baja del Abanico río Cañas en un área con relieve ligeramente ondulado.	54
Figura 2.20. Perfil quebrada Palma (P18) clasificado como Typic Kandistox, ubicado en un área de relieve ligeramente ondulado dedicada al cultivo de piña.	55
Figura 2.21. Perfil Cacao (P19) clasificado como Rhodic Kandistox, ubicado en un área dedicada al cultivo de caña de azúcar.	56

Figura 2.22. Perfil La Ceiba (P20) clasificado como Ustic Palehumults y paisaje asociado a su ubicación que corresponde al río General, límite natural entre los cantones Pérez Zeledón y Buenos Aires.	57
Figura 2.23. Perfil Las Juntas (P21) clasificado como Ustic Palehumults, ubicado en un área de relieve ligeramente ondulado, dedicada al cultivo de piña.	58
Figura 2.24. Perfil Ujarrás (P22) clasificado como Typic Ustorthents, ubicado en un terreno de relieve moderadamente ondulado con 15 % de pedregosidad superficial.	60
Figura 2.25. Comportamiento del contenido de arcilla (%) a través de la profundidad (cm) para P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 y P8.	68
Figura 2.26. Comportamiento del contenido de arcilla (%) a través de la profundidad (cm) para P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15 y P16.	69
Figura 2.27. Comportamiento del contenido de arcilla (%) a través de la profundidad (cm) para P17, P18, P19, P20, P21 y P22.	70
Figura 2.29. Comportamiento de la densidad aparente (g/cm^3) a través de la profundidad (cm) para P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15 y P16.	73
Figura 2.30. Comportamiento de la densidad aparente (g/cm^3) a través de la profundidad (cm) para P17, P18, P19, P20, P21 y P22.	74
Cuadro 2.11. Características químicas obtenidas para los perfiles P17, P18, P19 y P20. ..	80
Figura 2.31. Comportamiento de los contenidos de materia orgánica (%) a través de la profundidad (cm) para P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 y P8.	82
Figura 2.32. Comportamiento de los contenidos de materia orgánica (%) a través de la profundidad (cm) para P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15 y P16.	83
Figura 2.33. Comportamiento de los contenidos de materia orgánica (%) a través de la profundidad (cm) para P17, P18, P19, P20, P21 y P22.	84
Figura 2.34. Comportamiento de la saturación de bases (%) a través de la profundidad (cm) para P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 y P8.	85
Figura 2.35. Comportamiento de la saturación de bases (%) a través de la profundidad (cm) para P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15 y P16.	86
Figura 2.36. Comportamiento de la saturación de bases (%) a través de la profundidad (cm) para P17, P18, P19, P20, P21 y P22.	87
Figura 3.1. Sistema jerárquico de la taxonomía de suelos del USDA (IGAC 2015).	115

Figura 3.2. Stock de carbono (kg/m ²) a 100 cm de profundidad de los 22 perfiles clasificados.	134
Figura 3.3. Determinación del porcentaje (%) de vidrio volcánico mediante conteo de granos en microscopio petrográfico, para el horizonte A2 (15-35 cm) del perfil El Ángel Arriba (P5), clasificado como Vitrandic Ustorthents.	135
Figura 3.4. Órdenes de suelo y su evolución con el grado de evolución (a) y su fertilidad (b). Tomado de Jaramillo <i>et al.</i> (1994).....	137
Figura 4.1. Proceso de separación de arcillas, detalle precipitación de estas con la solución de cloruro de magnesio 1,0 M.	167
Figura 4.3. Triángulo textural para la definición del tamaño de partícula de Schoeneberger <i>et al.</i> (2012).	169
Figura 4.4. Difractograma de arcillas del perfil San Juancito (P1).	172
Figura 4.5. Difractograma de arcillas del perfil Volcán (P2).	172
Figura 4.6. Difractograma de arcillas del perfil Peje (P3).	173
Figura 4.7. Difractograma de arcillas del perfil San Llano Bonito (P4).	173
Figura 4.8. Difractograma de arcillas del perfil El Ángel Arriba (P5).	174
Figura 4.9. Difractograma de arcillas del perfil El Ángel (P6).	174
Figura 4.10. Difractograma de arcillas del perfil Guadalajara (P7).	175
Figura 4.11. Difractograma de arcillas del perfil Santa María (P8).	175
Figura 4.12. Difractograma de arcillas del perfil Convento (P9).	176
Figura 4.13. Difractograma de arcillas del perfil Buenos Aires (P10).	176
Figura 4.14. Difractograma de arcillas del perfil Cordoncillo (P11).	177
Figura 4.15. Difractograma de arcillas del perfil río Azul (P12).	177
Figura 4.16. Difractograma de arcillas del perfil Puente (P13).	178
Figura 4.17. Difractograma de arcillas del perfil Sabana La Pelona (P14).	178
Figura 4.18. Difractograma de arcillas del perfil Dúrika (P15).	179
Figura 4.19. Difractograma de arcillas del perfil Alto Guadalajara (P16).	179
Figura 4.20. Difractograma de arcillas del perfil río Cañas (P17).	180
Figura 4.21. Difractograma de arcillas del perfil quebrada Palma (P18).	180
Figura 4.22. Difractograma de arcillas del perfil Cacao (P19).	181
Figura 4.23. Difractograma de arcillas del perfil La Ceiba (P20).	181

Figura 4.24. Difractograma de arcillas del perfil Las Juntas (P21).....	182
Figura 4.25. Difractograma de arcillas del perfil Ujarrás (P22).....	182
Figura 4.26. Difractogramas agrupados en las 4 clases de mineralogía de arcillas halladas: gibbsítica (A), sésquica (B), alítica (C) y mezclada (D).	183
Figura 4.27. Temperaturas promedio (°C) registradas por la estación Planta Volcán, Buenos Aires, entre los años 2014 y 2020 (Fuente: IMN 2022).	185
Figura 4.28. Fotografías tomadas mediante microscopio electrónico de barrido de minerales de arcilla de los perfiles A. Llano Bonito (P4) y B. Río Cañas (P17) correspondientes a una clase mineralógica gibbsítica.....	189
Figura 4.29. Fotografías tomadas mediante microscopio electrónico de barrido de minerales de arcilla de los perfiles A. Buenos Aires (P10) y B. Quebrada Palma (P18) correspondientes a una clase mineralógica sésquica.	190
Figura 4.30. Fotografías tomadas mediante microscopio electrónico de barrido de minerales de arcilla de los perfiles A. El Ángel (P5) y B. Guadalajara (P7) correspondientes a una clase mineralógica alítica.....	190
Figura 4.31. Fotografías tomadas mediante microscopio electrónico de barrido de minerales de arcilla de los perfiles A. Alto Guadalajara (P16) y B. Ujarrás (P22) correspondientes a una clase mineralógica mezclada.	191
Figura 5.1. Mapa general de suelos de Costa Rica de 1979, elaborado por el Ing. Agr. Alexis Vásquez Morera (Tomado de Janzen 1991).	208
Figura 5.2. Mapa de suelos de Costa Rica de 1996, elaborado por Gómez y Méndez (1996).	209
Figura 5.3. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica de 2016, elaborado por Mata <i>et al.</i> (2016).	210
Figura 5.4. Mapa de órdenes suelos de Costa Rica de 2022, elaborado por Mata <i>et al.</i> (2022).	211
Figura 5.5. Ubicación de los pedones, observaciones simples, microcalicatas y perfiles de suelos de la base de datos del mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica (los números corresponden a su ID en la base de datos).	214
Figura 5.5. Mapa de órdenes suelos de la hoja Buenos Aires (escala 1:200.000).....	216
Figura 5.6. Mapa de subórdenes suelos de la hoja Buenos Aires (escala 1:200.000).	216

Figura 5.7. Mapa de grandes grupos de suelos de la hoja Buenos Aires (escala 1:200.000).	218
Figura 5.8. Mapa de subgrupos de suelos de la hoja Buenos Aires (escala 1:200.000)....	219
Figura 5.9. Mapa de familias de suelos de la hoja Buenos Aires (escala 1:200.000).	220
Figura 5.10. Porcentaje de dominancia de los subórdenes: Ustox, Humults, Orthents, Udands y asociación de Humults/Udepts en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas.....	225

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Tabla de interpretación de análisis de (Meléndez y Molina 2002).....	274
Anexo 2. Regímenes de temperatura del suelo, tomado de Schoeneberger <i>et al.</i> (2012) ..	274
Anexo 3. Hoja cartográfica Buenos Aires. Fuente: IGN (1980).....	275
Anexo 4. Mapa geológico de la hoja Buenos Aires. Fuente: Obando y Kussmaul (2009).	276
Anexo 5. Mapa geológico del flanco Pacífico Central de la Cordillera de Talamanca. Fuente: Ulloa y Delgado (2010).	277
Anexo 6. Mapa geomorfológico de Costa Rica (escala 1:100.000). Fuente: Bergoeing <i>et al.</i> (2015).	278
Anexo 7. Mapa de grandes paisajes fisiográficos de Costa Rica (escala 1:200.000). Fuente: Mata y Sandoval (2015).	279
Anexo 8. Mapa de subórdenes de suelos de Costa Rica (escala 1:200.000). Fuente: Mata <i>et</i> <i>al.</i> (2020).	280
Anexo 9. Mapa de subórdenes de suelos de Costa Rica (escala 1:200.000). Fuente: Mata <i>et</i> <i>al.</i> (2022).	281
Anexo 10. Porcentaje de dominancia de los grandes grupos de suelo encontrados en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas.	282
Anexo 11. Porcentaje de dominancia de los subgrupos de suelo encontrados en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas.....	283
Anexo 12. Porcentaje de dominancia de las familias de suelo encontradas en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas.....	284

LISTA DE ABREVIATURAS

ACCS: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
C. H.: Conductividad hidráulica.
CIA: Centro de Investigaciones Agronómicas.
CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico.
CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva.
CIEMIC: Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas.
CO: Carbono orgánico.
D. Ap: Densidad aparente.
D. part: Densidad de partículas o densidad real.
IGN: Instituto Geográfico Nacional.
IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
IMN: Instituto Meteorológico Nacional.
INDER: Instituto de Desarrollo Rural.
INTA: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria.
LRN: Laboratorio de Recursos Naturales.
MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
MO: Materia orgánica.
NRCS: Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos.
PCS: Proyecto de Cartografía Digital de Suelos de los Cantones Costeros de Costa Rica.
PINDECO: Pineapple Development Corporation.
UCR: Universidad de Costa Rica.
USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
SIG: Sistemas de Información Geográfica.

CAPÍTULO 1. FACTORES FORMADORES DE LOS SUELOS ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES ANTIGUOS EN BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA.

Introducción

El suelo es un sistema natural abierto y complejo que se forma en la superficie de la corteza terrestre, donde viven las plantas y gran diversidad de seres vivos (Loaiza 2011). Es el resultado de la meteorización *in situ* de materiales rocosos o la acumulación de materiales minerales transportados por agua, viento o hielo, a los que se agrega materia orgánica proveniente de fauna y plantas, en diversas etapas de descomposición, dando como resultado suelos con características distintivas (Nortcliff *et al.* 2006). Además, el suelo es un sistema dinámico complejo en el que ocurren interacciones entre agentes biológicos, químicos y físicos (Cardoso *et al.* 2013). En términos generales, se puede decir que el suelo es un cuerpo natural compuesto por horizontes, una combinación de materiales orgánicos y materiales de origen mineral, que varía de forma continua tanto en espacio como en el tiempo (Figueroa *et al.* 2018).

La pedogénesis es el proceso de formación del suelo, implica interacciones entre la litosfera, la hidrosfera, atmósfera y biosfera (Nortcliff *et al.* 2006) combinadas con la influencia de procesos naturales controlados por el clima, el material parental, la topografía y los organismos, en un periodo de tiempo, también conocidos como factores formadores (Bhattacharyya y Pal 2015). Los factores formadores de suelo son agentes, fuerzas, condiciones o combinación de estos, que actúan sobre un material original hasta transformarlo finalmente en suelo (Chinchilla *et al.* 2011).

Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica

Buenos Aires es el cantón número tres de la provincia de Puntarenas, cuenta con una extensión de 2 382,61 km². Al este limita con Talamanca y Coto Brus, al oeste con Pérez Zeledón, al norte con Talamanca y Pérez Zeledón y al sur con Osa y Coto Brus (Arauz 2010). Se compone por nueve distritos: Buenos Aires, Volcán, Potrero Grande, Boruca, Pílas, Colinas, Chánguena, Bioley y Brunka (INDER 2014).

El área de estudio de esta investigación está definida por los límites que se establecen en la hoja cartográfica Buenos Aires (IGN 1980) y el mapa geológico de la hoja Buenos Aires elaborado por Obando y Kussmaul (2009a). Esta área abarca parte sureste de los distritos San Pedro y Pejibaye de Pérez Zeledón, y parte de los distritos Volcán, Brunca y Buenos Aires, lo que corresponde aproximadamente a un 25 % del total del Cantón de Buenos Aires de Puntarenas.

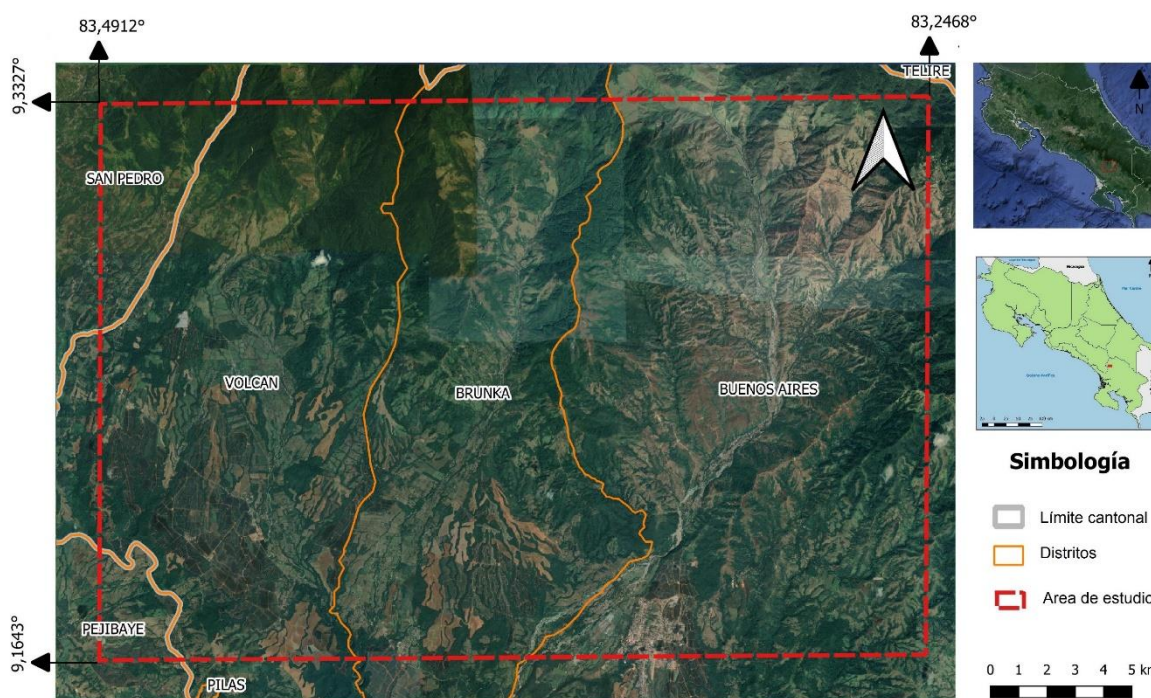


Figura 1.1. Área de estudio Buenos Aires de Puntarenas (hoja cartográfica Buenos Aires, IGN 1980).

En términos de hectáreas, la ganadería es la actividad económica más importante en Buenos Aires (Contreras y Díaz 2017). Para el 2019, se identificaron 61 191,42 hectáreas dedicadas a pastos, siendo el cantón con mayor área del paisaje productivo dedicada a pastos de la Región Brunca (Hernández *et al.* 2022).

La principal actividad económica en esta zona es el cultivo de piña, el cual supone un modo de producción de tipo monocultivo extensivo que comenzó en 1962 cuando el incremento en el valor de las tierras en Alajuela provocó el desarrollo económico en la zona sur; donde las

condiciones edáficas y el bajo costo de las tierras permitió el establecimiento de la Compañía Piñera del Sur (Cedeño *et al.* 2010). Posteriormente, entre 1963 y 1970 ocurre un aumento de un 67 % en la siembra de este cultivo debido a la llegada de la Compañía Piñera Americana con la que inició un proceso de tecnificación, con el fin de obtener un producto para la exportación (Cortés 1994).



Figura 1.2. Terreno con piña establecida y terreno preparado para ser cultivado con piña en Llano Bonito, Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.

Estos suelos se dedican a la producción agropecuaria principalmente de piña (figura 1.2), aunque también existe la producción de cítricos, mango, aguacate, palmito, tubérculos, raíces, caña de azúcar, café, granos básicos, marañón, tamarindo, caimito, melina, teca y la ganadería (Alonso y Solano 2017; Betrano 2017; Henríquez *et al.* 2017).

Factores formadores del suelo

Clima

El clima tiene una gran influencia en la formación del suelo, siendo sus componentes principales la temperatura y la precipitación (Zhang *et al.* 2019). En climas cálidos y húmedos, la tasa de formación del suelo es alta, debido a la rápida meteorización tanto física como química, porque tales condiciones propician la aparición de agentes biológicos que producen y transforman la materia orgánica. En climas fríos y secos, la tasa de desarrollo del suelo es baja, porque la meteorización es lenta y porque los agentes biológicos no prosperan

en ambientes fríos o secos (Braun y Kruijne 1994). La formación de suelo en climas cálidos y húmedos a menudo conduce a suelos profundos y fuertemente erosionados; mientras que los suelos formados bajo condiciones frías son generalmente delgados y ligeramente erosionados (FAO 2015).

Por una parte, la temperatura funciona como catalizadora de reacciones químicas en la descomposición y transformación de la roca madre y también en la transformación de restos de vegetación y organismos muertos a humus; según la Ley de Van T. Hoff, la velocidad de una reacción química se duplica y hasta se triplica con el aumento de 10 °C de temperatura; por otra parte, la caída de agua en forma de precipitación, esta agua de lluvia contiene diversas sustancias como oxígeno, anhídrido de carbono, sales, ácido nítrico y hasta polvo volcánico en solución y suspensión, y que actúa como solvente o como agente hidrolizante en la meteorización del material parental y en la descomposición de residuos orgánicos (Peters 1973).

En cuanto al factor clima, el área de estudio se encuentra en la denominada subregión climática Pacífico Sur, ya que abarca el Valle del General, la Península de Osa, el Valle de Coto Colorado, el Valle de Coto Brus y Golfito, incluyendo las estribaciones de la Cordillera de Talamanca del lado del Pacífico; esta región se caracteriza por su diversidad geográfica, ya que cuenta con extensos valles y la Cordillera de Talamanca, así como con influencia del Océano Pacífico, dando como resultado un clima en donde el período seco favorable y corto y un periodo el lluvioso intenso (MEH 1953).

El clima dominante es el tropical húmedo-seco muy lluvioso; su orografía permite la incursión de la humedad proveniente del Pacífico lo que favorece la precipitación y la existencia de áreas de recarga acuífera dándole al cantón un gran potencial hídrico, el cual constituye una gran ventaja para el desarrollo de diversas actividades productivas (Amador *et al.* 2011).

Se presentan dos distintas estaciones de precipitación; siendo entre los meses de diciembre y abril donde se registran menores precipitaciones; mientras que entre mayo y noviembre se

presentan las mayores precipitaciones. Además, se destaca, en el mes de julio una disminución en las precipitaciones, por el conocido “Veranillo de San Juan” (IMN 2022).

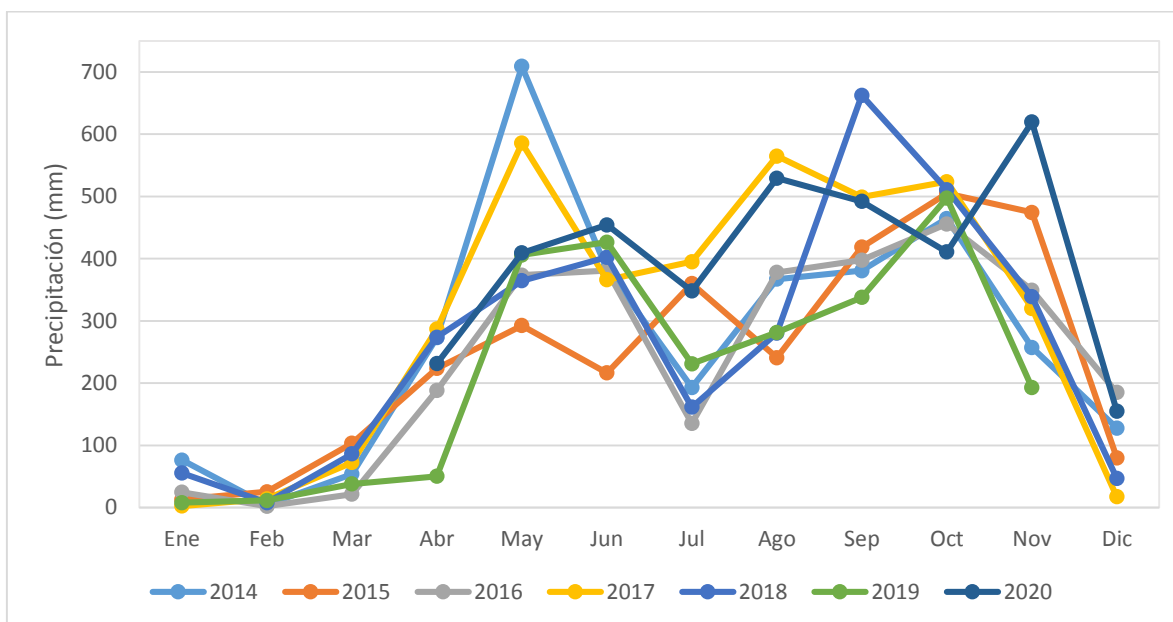


Figura 1.3. Precipitación promedio (°C) registrada por la estación Planta Volcán, Buenos Aires, entre los años 2014 y 2020 (Fuente: IMN 2022).

Según Solano y Villalobos (2001) la subregión Pacífico Sur, presenta un promedio anual de precipitación de 3050 mm, una temperatura media máxima anual de 29 °C y mínima de 18 °C, una temperatura media anual de 23 °C, un promedio de 175 días con lluvia, y un periodo seco de 3 meses. Los suelos tropicales, como los presentes en el área de estudio, se definen principalmente por el clima y la etapa de desarrollo genético, por el material parental y la topografía (Chesworth *et al.* 2008). Estos suelos están fuertemente erosionados y tienen menos nutrientes, como consecuencia de las altas temperaturas, las pendientes en las zonas altas y a las constantes lluvias a las que están expuestos (Tagami *et al.* 2012). En la figura 1.3 se muestra la precipitación promedio (°C) registrada por la estación Planta Volcán, Buenos Aires, entre los años 2014 y 2020.

La figura 1.4 muestra los meses secos que se pueden encontrar en el área de estudio, esta figura fue elaborada con la capa de meses secos del Atlas Digital de Costa Rica (TEC 2014).

Los meses secos son parámetro muy importante en el estudio de suelos, hace indicación sobre las condición predominante de humedad del suelo de un sitio, ya sea mediante estimaciones o medido, y utilizado como criterio en la taxonomía de suelos, para pasar de una categoría general (orden) a categorías superiores (Schoeneberger *et al.* 2012).

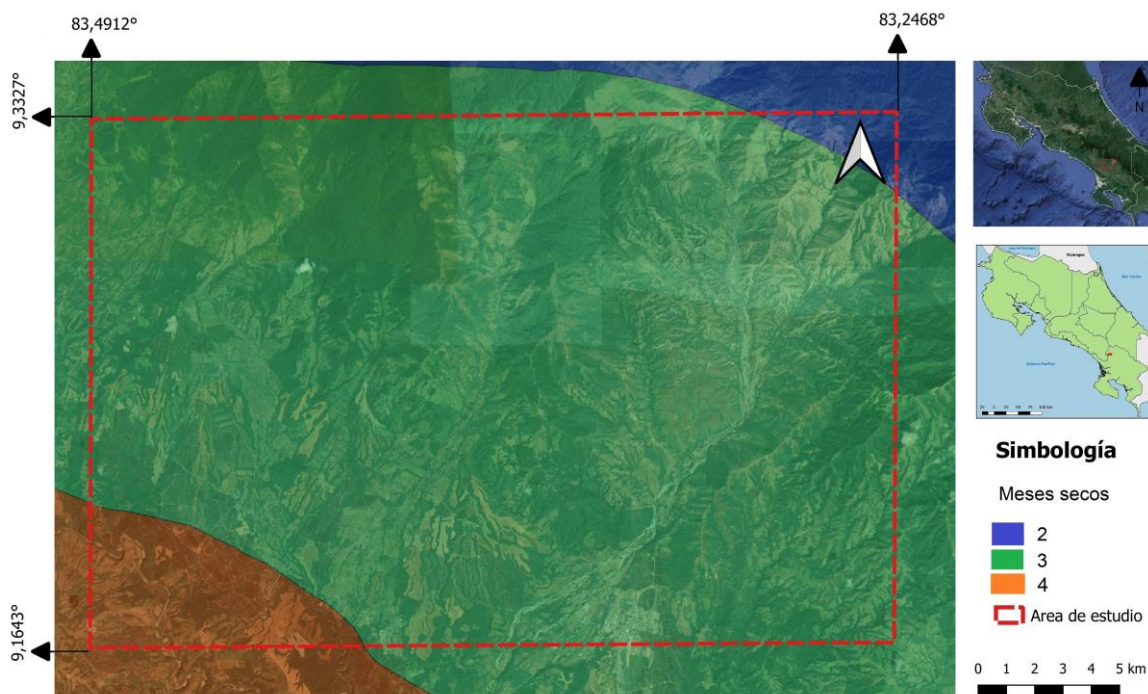


Figura 1.4. Meses secos en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.

El balance hídrico fue realizado con datos climáticos de una estación meteorológica Volcán, ubicada dentro del área de estudio (figura 1.5). La figura muestra que se presentan más de 5 meses secos, y la evapotranspiración potencial (mm/mes) (calculada con la fórmula de Hargreaves y Samani 1985) es mayor a la precipitación (mm) en la mayor parte del año, por lo que se puede establecer que esta zona posee a un régimen de humedad ústico, lo que indica que el suelo está seco por más de 90 días acumulados en años normales, por lo que humedad de suelo es limitada, pero permite el crecimiento de las plantas. El régimen de humedad del suelo es utilizado en la taxonomía de suelos, para pasar de una categoría de órdenes a subórdenes en Oxisoles y Ultisoles y de suborden a gran grupo en Entisoles.

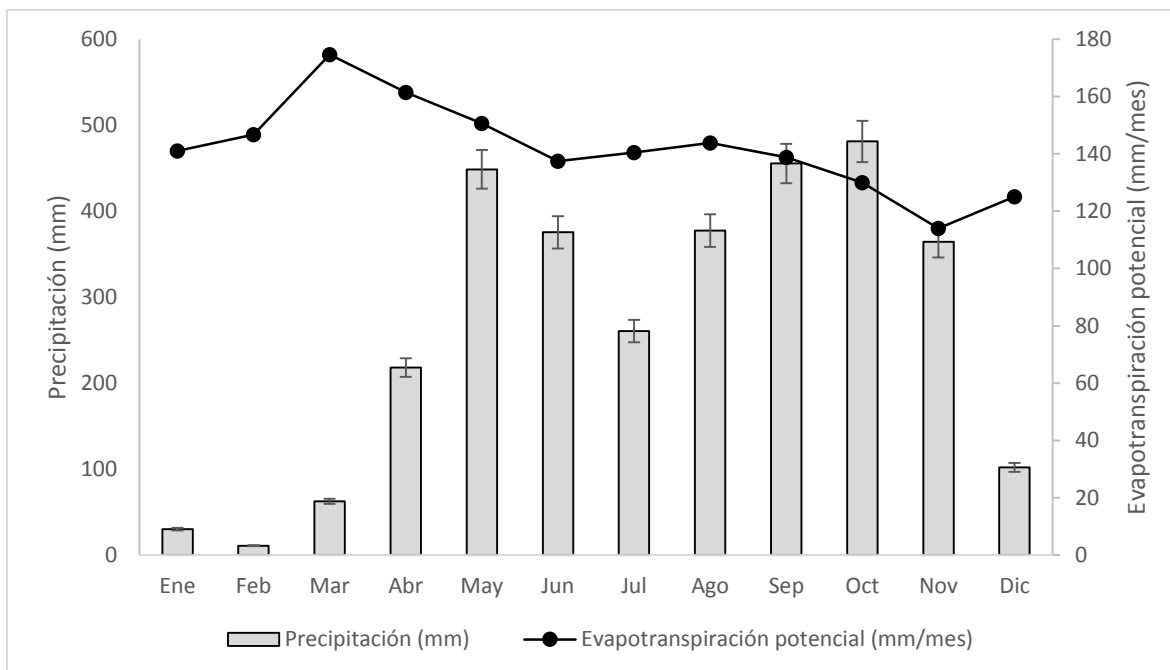


Figura 1.5. Balace hídrico realizado con datos climáticos de la estación Planta Volcán, Buenos Aires, entre los años 2014 y 2020 (Fuente: IMN 2022).

Material parental

La naturaleza de la roca madre subyacente a partir de la cual el suelo se desarrolla, determina en gran medida el producto intermedio o final del proceso pedogenético (Braun y Kruijne 1994). El material parental se compone por aquellos materiales, ya sean saprolitos, producto de la alteración de las rocas, o sedimentos no consolidados de cualquier procedencia y composición (Jaramillo 2002). Es un depósito geológico sobre y dentro del cual se desarrolla un suelo, que se encuentra al excavar debajo del suelo; representa la geología más cercana a la superficie meteorizada, mientras que los depósitos más profundos son los menos erosionados; la interfaz entre suelo y la roca madre puede variar de un límite nítido, claramente definido, a uno continuo difuso sin un punto distintivo de transición entre ellos (Lawley 2009).

Hacia la parte de mayor elevación del área de estudio se encuentra la cordillera de Talamanca, la cual es un macizo volcánico-intrusivo constituido por rocas sedimentarias marinas, volcánicas plutónicas de la era terciaria, del Oligoceno medio, hace aproximadamente 26

millones de años (McConnell 2008). Gabb (1874) reconoce que la cordillera está constituida en su mayor parte por rocas plutónicas, entre las que se encuentran granitos y sienitas.

El piedemonte de la Cordillera de Talamanca y los flancos de los intrusivos, están compuestos por una base de rocas sedimentarias de la Formación Térraba de edad Oligoceno-Mioceno, con materiales que varían desde conglomerados varicoloreados hasta secuencias de areniscas y lutitas tipo turbidita (Sprechman 1984). Los procesos de erosión de la cordillera de Talamanca produjeron enormes flujos de sedimentos hacia el Valle del General, los cuales se emplazaron en forma de abanicos aluviales (Protti 1996).

En el área de estudio se destacan tres formaciones de origen sedimentario (Abanicos aluviales, Formación Valle del General y Formación Curré) y dos formaciones de origen ígneo (grupo intrusivo Talamanca y vulcanismo post-intrusivo), las cuales se detallan a continuación:

Abanicos aluviales

Como mencionan Ulloa y Delgado (2010), la Cordillera de Talamanca ha tenido un intenso levantamiento (1 km/Ma para los últimos 3 millones de años), el cual es contrarrestado por una fuerte erosión que da lugar a la deposición de sedimentos al pie de la cordillera, que se manifiestan en la Formación Valle de El General, con morfologías en forma de depósitos coluviales, terrazas aluviales del Holoceno y abanicos aluviales de entre 400 m y 600 m de espesor (Mora 1979a, Kesel 1983, Ramos 1998).

Formación Valle del General

Esta formación está constituida por depósitos aluviales que presentan bloques de rocas ígneas (intrusivas y volcánicas) y sedimentarias con metamorfismo de bajo grado (Castillo 1978). La matriz es limo-arenosa de color café hasta naranja, desarrolla una capa arcillosa debida a la meteorización de aproximadamente 7 m (Ulloa y Delgado 2010). Su origen se asocia a los depósitos producto de la erosión de la Cordillera de Talamanca. Se extiende desde San Isidro de El General hasta Buenos Aires, con espesores de hasta 400 m de edad Pliocena-Cuaternaria basada en dataciones de carbono (Kesel 1983).

Formación Curré

En el flanco suroeste de la cordillera de Talamanca afloran rocas sedimentarias formadas en el talud, sobreyacidas por sedimentos de plataforma del Mioceno (Gabb 1874; Weyl 1957). La Formación Curré incluye estratos de areniscas que se intercalan con capas de lutitas-conglomerados y detritos volcánicos, su origen se asocia a un ambiente de transición marina de poca profundidad (Quesada-Román 2016). Según Ulloa y Delgado (2010), esta formación no ha sido bien diferenciada, ya que las rocas presentan diferentes tipos de alteración por influencia de las rocas intrusivas, lo que dificulta reconocer algunas de las facies originales.

Grupo intrusivo Talamanca

Este intrusivo es de edad Mioceno entre 11,05 a 6,3 millones de años (Alvarado *et al.* 1992; De Boer *et al.* 1995; Drummond *et al.* 1995; Abratis 1998; McMillan *et al.* 2004), e incluye secuencias sedimentarias y unidades volcánicas pre-intrusivas del Mioceno Inferior-Medio (Ulloa y Delgado 2010), que se caracteriza por presentar alteraciones hidrotermales y metamorfismo (Quesada-Román 2016). En el área de estudio, estas formaciones afloran al norte de Ujarrás (sabanas Oka), la comunidad Dúrika, fila Santa María, Alto Helechales, alrededores de Guadalajara, base del cerro Cabécar y al norte de la comunidad de Bolas de Buenos Aires. La mineralogía y composición de los cuerpos intrusivos varían desde rocas graníticas, grabros de olivinos, monzonitas cuarzosas (figura 1.6), granodioritas y tonalitas, con diferenciaciones porcentuales de la abundancia de los minerales constituyentes (Quesada-Román 2016).

Vulcanismo post-intrusivo

Lo integran eventos volcánicos recientes posteriores al evento plutónico de la cordillera de Talamanca, y se manifiesta en forma de domos silíceos, andesitas y basaltos, los cuales tienen una afinidad adakítica (Drummond 1995; De Boer 1995; Abratis 1998; Abratis y Wörner 2001; McMillan *et al.* 2004; Gazel *et al.* 2009). La edad de estas rocas oscila entre 4,5 y 0,9 millones de años; y a partir de análisis geomorfológicos de mapas, fotos aéreas y observación directa en el campo, Ulloa y Delgado (2010) interpretan que esta unidad volcánica se encuentra sobreyaciendo las rocas del grupo Intrusivo de Talamanca, y esta representado por andesitas, basaltos y flujos de piroclastos.



Figura 1.6. Campo con rocas monzonitas cuarzosas en Cordoncillo, Buenos Aires de Puntarenas, y detalle del interior y la matriz de la roca.

Relieve (Topografía)

El término topografía se refiere a la configuración de la superficie del terreno, incorpora la geomorfología o relieve, su aspecto, la forma general y la conectividad de las superficies terrestres; el relieve topográfico imparte energía potencial, en virtud de la gravedad, para mover el agua y materiales que forman el suelo, desde las posiciones más altas del paisaje hasta las más bajas (Graham 2006). El suelo se forma dentro de una topografía que puede ser plana, casi plana, ligeramente inclinada, moderadamente inclinada o empinada; cada accidente geográfico se caracteriza por una pendiente o secuencia de pendientes particular, y también por un material parental particular (Braun y Kruijne 1994).

Los procesos que crean la topografía suelen ser de naturaleza geológica como levantamientos tectónicos, erosión y deposición fluvial, desgaste de masas de suelo, actividad volcánica y glaciación; a medida que pasa el tiempo, estos procesos dejan huellas características pedogénicas en diferentes partes del paisaje, alterando los materiales parentales originales y diferenciando la naturaleza física, química y biológica de los suelos por posición topográfica (Graham 2006). Las elevaciones en el cantón Buenos Aires de Puntarenas pueden ir desde

los 360 m s. n. m., en el centro de la ciudad, hasta los 2400 m s. n. m. en las estribaciones de la Cordillera de Talamanca (Delgado *et al.* 2011).



Figura 1.7. Piñal con un relieve plano a 407 m s. n. m. en la localidad de Santa Marta y la Cola del Dragón con altitudes entre 600 y 1800 m s. n. m., en Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.

El área de estudio en sus partes altas se caracteriza por presentar cimas agudas con vertientes heterogéneas en longitud, geometría y orientación; en las partes medias, por la presencia de valles intermontanos, y su inclinación disminuye conforme se desciende hacia las partes bajas; las partes bajas corresponden a superficies de poco inclinadas a planas (Delgado *et al.* 2011).

Según Protti (1996), hacia finales del periodo Terciario ocurrió un intenso levantamiento que originó la actual Cordillera de Talamanca, posteriormente la erosión de la cordillera produjo grandes flujos de sedimentos hacia el Valle del General, los cuales se emplazaron en forma de abanicos de hasta 10 km de extensión en su base, más de 6 km de largo y espesores de más de 100 m de profundidad, que se transponen en forma de rampa con materiales relativamente recientes y poco consolidados (Quesada-Román 2016).

Mora (1979b), menciona la presencia de depósitos de rocas sedimentarias formados por materiales de distintos tamaños, con bordes angulosos y de hasta 4 m de diámetro, también conocidos como fanglomerados en la región del piedemonte de la Cordillera de Talamanca, y los describe como abanicos aluviales, producto de la erosión masiva de la cordillera, tanto

durante su emplazamiento, como durante el deshielo de los glaciares en el Pleistoceno. Desde el final del período glaciación hasta la actualidad, la erosión fluvial ha producido un modelado particular que muestran los cauces actuales de los ríos San Pedro y San Rafael, en donde se observan valles fluviales en V cortando los extensos valles en U (Protti 1996).

Organismos

Los organismos que influyen en la formación del suelo se pueden subdividir convenientemente en plantas superiores, microorganismos, vertebrados y meso-fauna, estos organismos mezclan la matriz del suelo y dan lugar a la formación de materia orgánica; las condiciones de humedad y las altas temperaturas del suelo tienen un efecto favorable sobre la actividad biológica (Braun y Kruijne 1994). Las funciones de los organismos en la formación del suelo son extensas y diversas, la formación del suelo es un proceso biogénico, que comienza desde el momento del asentamiento de los organismos vivos en rocas sedimentarias y rocas cristalinas masivas; también es conocido que los organismos son la única fuente de materia orgánica, que sirve como material para la formación de humus del suelo (Vladychenskiy 2011).

Las plantas, invertebrados y microorganismos están involucrados en la estructuración del suelo y son factores clave de agregación a través de bioturbación, descomposición de materia orgánica y secreción de materia orgánica biogénica; así mismo, la calidad del suelo, las funciones y el ciclo de nutrientes generalmente se benefician de la actividad de organismos del suelo que con frecuencia provocan cambios sustanciales en las propiedades del suelo mediante la formación de agregados (Guhra *et al.* 2021). Los organismos del suelo son ingenieros de ecosistemas, ya que crean, modifican y mantienen hábitats, modulando directa o indirectamente la disponibilidad de recursos para otras especies (Jones *et al.* 1994).

En el área de estudio predominan las zonas de vida del Bosque húmedo tropical y Bosque muy húmedo premontano; la precipitación promedio anual es alta, lo que se traduce en una gran biodiversidad y abundante vegetación (Delgado *et al.* 2011). Las partes más altas corresponden a zonas protegidas del Parque Internacional La Amistad, y cuenta con una zona de amortiguamiento en la que existe una fuerte presencia de ganadería de pastoreo y cultivo

de café, las zonas son bajas siendo utilizadas principalmente en la producción de piña por parte de PINDECO (Segura-Serrano 2014). La figura 1.8 muestra las zonas de vida de Holdridge que se encuentran presentes en el área de estudio, esta figura fue elaborada con la capa de zonas de vida del Atlas Digital de Costa Rica (TEC 2014).

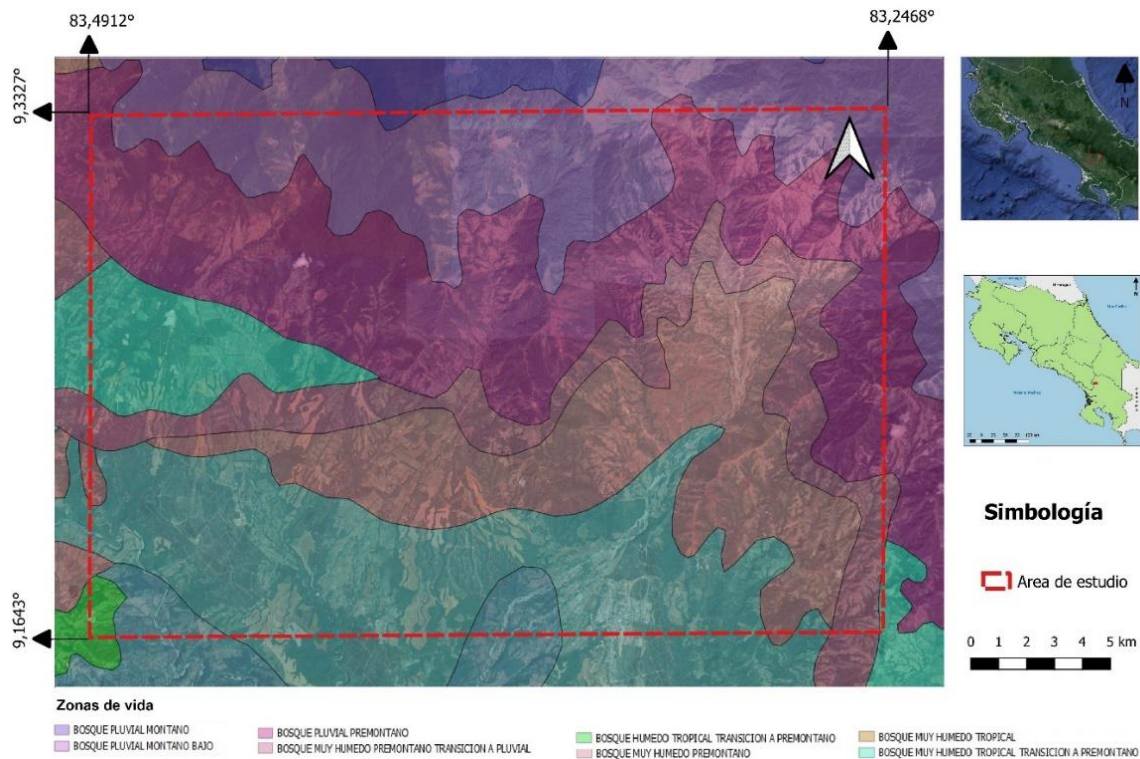


Figura 1.8. Zonas de vida de Holdridge presentes en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.

Dada la ubicación del Parque Internacional La Amistad, la Cordillera de Talamanca y Reservas indígenas, permiten la movilidad de diversas especies de fauna y en sí, una amplia diversidad biológica; en la zona se pueden encontrar especies como saínos, dantas, tepezcuintles, venados, pizotes, armadillos, zopilote, cariblanco, cabros de montes, conejos de montes, ceibitas, manigordos, jaguares, pumas, cauceles, leones breñeros, tigrillos, mapaches, martillas, monos congo, monos colorado, monos carablanca, nutrias, puerco espines y zorrillos; en cuanto a las aves se puede hallar águila harpía, águila crestada, águila solitaria, codorniz moteada, capitán cocora, colibrí volcánico, colibrí garganta de fuego, gavilán colirrojo, halcón pechiscastaño, junco volcánico, lechucita serranera, paloma

collareja, pava negra, perico aliamarillo, periquito listado, tucancillo verde, viuda roja, zopilote cabecirrojo, entre otras especies (INDER 2014).

La vegetación dominante existe gran abundancia de plantas superiores e inferiores, entre las que se pueden mencionar musgos, líquenes, helechos y orquídeas; en las sabanas se encuentra la presencia de pastos (INDER 2014). Las sabanas han sido ampliamente modificadas desde inicios de 1970, ya que estos espacios se han destinado a usos tanto urbanos, justamente el espacio ocupado por la actual ciudad de Buenos Aires; como agrícolas donde se cultivan importantes volúmenes de piña; ambas, directamente se traducen como una disminución del ecosistema de sabana (Artavia 2011).

Tiempo

El tiempo es un factor pasivo en el proceso de formación del suelo, ya que los factores formadores antes mencionados, expresan sus efectos en función del tiempo durante el cual han ejercido su influencia (Braun y Kruijne 1994). En general, los suelos desarrollados en depósitos aluviales no han tenido tiempo suficiente para evolucionar; mientras que los más viejos, como los de zonas tropicales húmedas, generalmente tienen perfiles de suelo más profundos, están más meteorizados, contienen horizontes gruesos y han perdido sus nutrientes debido a procesos de lixiviación (Barrios *et al.* 2001).

En síntesis, el suelo es el producto de la acción del clima y los organismos vivos sobre el material parental, condicionado por la topografía local; el período de tiempo durante el cual estas fuerzas están operativas, es de gran importancia para determinar el carácter del resultado final (Paz y Rodríguez 2008). Desde el punto de vista pedológico, las actividades humanas no tienen un impacto importante en los suelos, ya que han tenido lugar solo durante un tiempo relativamente corto; sin embargo, desde un punto de vista agrícola, tienen un gran impacto, ya que las propiedades del suelo a menudo se ven seriamente modificadas por la intervención humana (Braun y Kruijne 1994).

El tiempo de formación de los suelos de la zona de Buenos Aires se remonta a los procesos de meteorización de las rocas de la Cordillera de Talamanca en Cuaternario tardío, cuyos sedimentos se depositaron en las partes bajas formando abanicos aluviales que constituyen

hoy en día, gran parte del Valle del General; según Obando y Kussmaul (2009b) en su estudio de la hoja geológica Buenos Aires, aunque no realizaron dataciones, mencionan que estos abanicos se formaron durante el periodo de deshielo del alto Talamanca, probablemente después de la glaciación Würm, la cual terminó hace 12 000 años, y dividen los abanicos aluviales San Juancito, río Convento, Cacao, Sabanilla, Llano Bonito, quebrada Juntas y quebrada Palma en abanicos jóvenes; y los abanicos Cordoncillo, río Ángel, río Cañas, y Buenos Aires como abanicos antiguos; los abanicos antiguos cubren un área de 64 km², mientras que los abanicos jóvenes cubren un área de unos 115 km².

Los abanicos aluviales son erosionados por los ríos que llevan su nombre, lo que se evidencia en terrazas con escarpes de alturas de hasta 80 m de altura (Obando y Kussmaul 2009b), que, junto con acciones antrópicas como las actividades agrícolas intensivas y la construcción de emplazamientos humanos, continúan erosionando fuertemente estos materiales que finalmente son transportados por el río Térraba (Artavia 2011).

Objetivo general

- ❖ Caracterizar, clasificar a nivel de familia mineralógica y ubicar los suelos altamente meteorizados derivados de abanicos aluviales antiguos en Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.

Objetivos específicos

- ❖ Determinar las principales características físicas y químicas de los suelos derivados de abanicos aluviales de la zona noroeste del cantón Buenos Aires de Puntarenas.
- ❖ Clasificar taxonómicamente los suelos derivados de abanicos aluviales antiguos de la zona noroeste del cantón Buenos Aires de Puntarenas, según sus características mineralógicas.
- ❖ Realizar una prospección de los suelos identificados en la zona noroeste del cantón Buenos Aires de Puntarenas, a una escala 1:200.000.

Literatura citada

Abratis, M. 1998. Geochemical variations in magmatic rocks from southern Costa Rica as a consequence of Cocos Ridge subduction and uplift of the Cordillera de Talamanca. Universidad de Göttingen, Alemania [Tesis Ph. D]. 134 p.

Abratis, M; Wörmer, G. 2001. Ridge collision slab-window formation, and the flux of Pacific asthenosphere into the Caribbean realm. *Geology* 29, 127-130 p.

Alonso, S; Solano, J. 2017. Investigación y análisis bibliográfico sobre la dinámica de uso de suelo: procesos en juego e impacto en Costa Rica. CINPE. Cuadernos de política económica. Heredia, Costa Rica. 52 p.

Alvarado, GE; Kussmaul, S; Chiesa, S; Gillot, PY; Appel, H; Wörmer, G; Rundle, C. 1992. Resumen cronoestratigráfico de las rocas ígneas de Costa Rica, basado en dataciones radiométricas. *J. South Amer. Earth Sci.* 6 (3): 151–168 p.

Amador, M; Sánchez, J; Arguedas, M; Araya, R; Guevara, F; Maroto, D; Sánchez, J; Vargas, F. 2011. Informe final de investigación. Estudio regional sobre el desarrollo local de los cantones (trans) fronterizos del Pacífico Sur de Costa Rica. Instituto de formación y capacitación municipal y de desarrollo local. Universidad Estatal a Distancia (UNED). San José, Costa Rica. 432 p.

Arauz, II. 2010. Análisis del Sistema Turístico del Cantón de Buenos Aires: Insumo para un Diseño de Plan de Desarrollo en Turismo Rural. EUMED. Universidad de Málaga. Málaga, España. 126 p.

Artavia, LG. 2011. *Revista Geográfica de América Central* Número Especial EGAL 2011-Costa Rica II. 1–15 p.

Barrios, E; Bekunda, M; Delve, RJ; Esilaba, A; Mowo, J. 2001. Identifying and classifying local indicators of soil quality. Eastern Africa Version. Participatory Methods for Decision Making in Natural Resource Management. CIAT-SWNM-TSBF-AHI.

Betrano, S. 2017. Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Evolución sobre la legislación sobre uso del suelo en Costa Rica (1949-2016). 472 p.

Bhattacharyya, T; Pal, DK. 2015. Soil. Science an introduction. 1 Ed. New Delhi. 39–56 p.

Braun, HMM; Kruijne R. 1994. Soil Conditions. In: Ritzema, HP (Ed.). Drainage Principles and Applications. ILRI Publication 16. 77-110 p.

Cardoso, EJB; Vasconcellos, RLF; Bini, D; Miyauchi, MYH; dos Santos, CA; Alves, PRL; de Paula, AM; Nakatani, AS; Pereira, JM; Nogueira, MA. 2013. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Scientia Agricola*, 70. 274–289 p.

Castillo, R. 1978: Geología regional preliminar de una parte del Valle de El General, Costa Rica. Departamento de Desarrollo Geológico y Recursos Minerales, CODESA, Bol. Geol., 1: 289-293 p.

Cedeño, B; Hernández-Ulate, A; López, A; Villalobos, E. 2010. Caracterización socioeconómica de la Cuenca del río Grande de Térraba. Escuela de Relaciones Internacionales. Universidad Nacional (UNA). Heredia, Costa Rica. 36 p.

Chesworth, W; Finkl, C; Doran, JW; Mielke, LN; Mielke, MB; Groenevelt, CW. 2008. Tropical soils. In: Chesworth, W. (Eds.). *Encyclopedia of Soil Science*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_607

Chinchilla, M; Alvarado, A; Mata, R. 2011. Factores formadores y distribución de suelos de la subcuenca del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 35 (1): 33-57. ISSN: 0377-9424.

Contreras, M; Díaz, R. 2017. Posibilidades locales de desarrollo en presencia de enclaves: Caso de la Asociación de Productores de Piña de la comunidad de Utrapez, ubicada en la Zona Sur de Costa Rica. *Perspectivas Rurales* (29), 43-72 p.

Cortés, G. 1994. Atlas Agropecuario de Costa Rica. EUNED (Editorial Universidad Estatal a Distancia). San José, Costa Rica. 479-490 p.

De Boer, JZ; Drummond, MS; Bordelon, MJ; Defant, MJ; Bellon, H. Maury, RC. 1995. Cenozoic magmatic phases of the Costa Rican island arc (Cordillera de Talamanca). En: Mann, P (Ed.). *Geologic and Tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America*. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 295: 35-55 p.

Delgado, O; Carpio, C; Padilla, F; Ureña, F. 2011. *Prospección Región del Diquís, Cantón de Buenos Aires*. MIVAH – DVAH. 61 p.

Drummond, MS; Bordelon, M; De Boer, J; Defant, MJ; Bellon, H; Feigenson, MD. 1995. Igneous petrogenesis and tectonic settings of plutonic and volcanic rocks of the Cordillera de Talamanca, Costa Rica-Panama, Central American Arc. *American Journal of Science* 295 (7): 875-919 p.

FAO. 2015. *Understanding Mountain Soils: A contribution from mountain areas to the International Year of Soils 2015*, by Romeo, R; Vita, A; Manuelli, S; Zanini, E; Freppaz, M; Stanchi, S. Rome, Italy. 169 p.

Figueroa, ML; Martínez, MR; Ortiz, CA; Fernández, D. 2018. Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana*, 36 (3), 287-299. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.259>.

Gabb, WM. 1874: On the Geology of Republic of Costa Rica. Transcripción de Lucke, OH; Gutiérrez, V; Soto, G. 2007 [del original del manuscrito de la biblioteca del U.S. Geological Survey, bajo la signatura 203(386) gG20]. Rev. Geol. Amér. Central, 37 Especial: 103-118 p.

Gazel, E; Carr, M; Hoernle, K; Feigenson, MD; Szymanski, D; Hauff, F; Bogaard, P. 2009. Galápagos-OIB signature in southern Central America: Mantle refertilization by arc-hot spot interaction. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 10 (2): 1–32 p.

Graham, R. 2006. Factors of soil formation: Topography. In R. Scalenghe (Author) & G. Certini (Eds.). *Soils: Basic Concepts and Future Challenges* 151-164 p. Cambridge: Cambridge University Press.

Guhra, T; Stolze, K; Totsche, KU. 2021. The contribution of biogenic organic matter to aggregation in soil - a review, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-14927, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14927>, 2021.

Hargreaves, GH; Samani, ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1 (2): 96-99 p.

Henríquez, C; Cabalceta, G; Bertsch, F; Alvarado, A. 2017. Principales suelos de Costa Rica. Origen, características y manejo. Editado por la ACCS (Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo). San José, Costa Rica. 7 p.

Hernández Hernández, S; Aguilar Arias, H; Ávila Pérez, I; Acuña López, S; Vargas Solano, Y; Vargas Céspedes, A; Obando Picado, MF; Calvo Elizondo, Y; Jiménez Rodríguez, M; Fernández Garro, J; Fallas Montero, E; Romero Badilla, D; Manrow Villalobos, M; Miller Granados, C. 2022. Informe final del paisaje productivo de pastos año 2019. PRIAS-CONARE–CENAT. San José, Costa Rica. 98 p.

IGN (Instituto Geográfico Nacional). 1980. Hoja cartográfica Buenos Aires 3543 IV. 3 Ed. San José, Costa Rica. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2022. Datos, Estación Meteorológica Planta Volcán, Buenos Aires, Puntarenas. 2014-2020.

INDER (Instituto de Desarrollo Rural). 2014. Región Brunca. Territorio Buenos Aires – Coto Brus. Informe de caracterización del territorio. San José, Costa Rica. 71 p.

Jaramillo, DF. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia. 619 p.

Jones, CG; Lawton, JH; Shachak, M. 1994. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* 69, 373-386 p. Wallwork, JA. (1970). *Ecology of Soil Animals*. (McGraw Hill, London).

Kesel, RH. 1983: Quaternary History of the río General Valle, Costa Rica. *Nat. Geogr. Res. Rep.* 15: 339-358 p.

Lawley, R. 2009. The soil - parent material database: A User Guide. British Geological Survey Internal Report, OR/08/034. 45 p.

Loaiza, JC. 2011. El recurso suelo. *Suelos Ecuatoriales*. 41. 6–18 p.

McConnell, C. 2008. Iniciativas de manejo en la subcuenca del río Volcán, cuenca del río Grande de Térraba. Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola. Cartago, Costa Rica. 78 p.

McMillan, I; Gans, P; Alvarado, G. 2004. Middle to present plate tectonic history of the southern Central American Volcanic Arc. *Tectonophysics*, 392: 325–348 p.

MEH (Ministerio de Economía y Hacienda). 1953. Dirección General de Estadísticas y Censos. Atlas Estadístico de Costa Rica. San José, Costa Rica. 114 p.

Mora, S. 1979a: Estudio geológico de una parte de la región sureste del Valle del General, provincia de Puntarenas. Tesis para optar por el grado académico de Licenciado en Geología. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. 188 p.

Mora, S. 1979b. Proyecto Hidroeléctrico de Boruca. Estudio Geológico Regional. Instituto Costarricense de Electricidad, San José.

Nortcliff, S; Hulpke, H; Bannick, CG; Terytze, K; Knoop, G; Bredemeier, M; Schulte-Bisping, H; Auerswald, K; Litz, N; Mayer, R; Stoy, A; Kassem, A; Kerndorff, H; Crössmann, G; Eikmann, T; Franzius, V; Grimsky, D; Möhlenbruch, N; Dworshak, PC. 2006. Soil, Definition, Function, and Utilization of Soil. 10.1002/14356007.b07_613.pub2

Obando, LG; Kussmaul, S. 2009a. Geología de la hoja Buenos Aires, Costa Rica. Revista Geológica de América Central. 41: 123-136 p.

Obando, LG; Kussmaul, S. 2009b. Mapa geológico de la hoja Buenos Aires, Costa Rica. Revista Geológica de América Central. 41: 2 p.

Paz, CG; Rodríguez, TT. 2008. Factors of Soil Formation. In: Chesworth, W. (Eds.). Encyclopedia of Soil Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_207

Peters, W. 1973. Suelos y ecosistemas del Trópico Húmedo. Revista de la Facultad de Agronomía Vol. 2. No. 3. Enero-Diciembre. 69-85 p.

Protti, R. 1996. Evidencias de glaciación en el Valle del General (Costa Rica) durante el Pleistoceno Tardío. Revista Geológica de América Central. 19/20: 75-85 p.

Quesada-Román, A. 2016. Peligros geomorfológicos: Inundaciones y procesos de ladera en la Cuenca Alta del río General, Pérez Zeledón, Costa Rica. Tesis para optar por el grado de: Maestro en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México D. F. 157 p.

Ramos, V. 1998. Estudio geológico integral del pueblo de Bonanza y alrededores, cantón de Coto Brus, Provincia de Puntarenas, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Inf. Campaña Geológica. San José, Costa Rica. 111 p.

Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE. Natl. Soil Surv. Ctr., Lincoln, NE (September).

Segura-Serrano, L. 2014. Conocimiento de la dinámica fluvial como herramienta para la planificación territorial. Caso río Volcán, Buenos Aires, Puntarenas, Costa Rica. Revista Tecnología en Marcha. 27. 12. 10.18845/tm.v27i0.2010.

Solano, J; Villalobos, G. 2001. Aspectos fisiográficos básicos para las principales regiones de Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. 15.

Sprechmnan, P. 1984. Manual de Geología de Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica.

Tagami, K; Twining, J; Wasserman, M. 2012. Terrestrial Radioecology in Tropical Systems. Radioactivity in the Environment, Elsevier, Volume 18, 155-230 p.

TEC (Instituto Tecnológico de Costa Rica). 2014. Atlas Digital de Costa Rica.

Ulloa, A; Delgado; CE. 2010. Características geoquímicas y mineralogía de las rocas magmáticas del flanco Pacífico Central de la Cordillera de Talamanca: Implicaciones para la

evolución de una corteza continental. Tesis para optar por el grado académico de Licenciado en Geología. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. 177 p.

Vladychenskiy, AS. 2011. Genesis of Soils and Factors of Soil Formation. Encyclopedia of Life Support Systems. 6 p.

Weyl, R. 1957. Contribución a la geología de la Cordillera de Talamanca. Instituto Geográfico Nacional (IGN). San José, Costa Rica. 75 p.

Zhang, YY; Wu, W; Liu, H. 2019. Factors affecting variations of soil pH in different horizons in hilly regions. *PloS one*, 14(6), e0218563. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218563>

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES ANTIGUOS EN LA ZONA DE BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA.

Introducción

El conocimiento de las clases y propiedades de los suelos es fundamental para la toma de decisiones relacionadas a la producción de cultivos (Yitbarek *et al.* 2016); a través de la medición precisa y la comprensión completa de la naturaleza y las propiedades de los suelos, así como un manejo adecuado de los requerimientos de nutrientes y humedad que puede maximizar la producción de cultivos hasta los límites de potencial permisibles (Esayas y Debele 2006). Así mismo, se requiere de información detallada sobre las propiedades del suelo para evaluar la calidad y su potencial para producir alimentos, forrajes, fibras y combustibles para las generaciones presentes y futuras (Yitbarek *et al.* 2016). El desafío para definir la variabilidad en el suelo no solo es delimitar los cuerpos naturales, sino también de cuantificar sus constituyentes y propiedades; por ejemplo, las enmiendas con cal o las fertilizaciones, requieren de un conocimiento del suelo para determinar las cantidades necesarias para producir un cultivo sin aplicar demasiado o de manera insuficientemente (Morris *et al.* 2010). En estudios de construcción de infraestructura, es de suma importancia contar con el conocimiento de las propiedades de los suelos; carreteras, ferrocarriles y edificios, se están construyendo cada vez más en suelos con condiciones particulares, como arcillas blandas, limos y arenas sueltas, en todos estos casos, la respuesta de los geomateriales es compleja y muy variable, y presenta importantes desafíos de diseño y construcción de obras ingenieriles (L'Heureux y Lunne 2020).

El estudio del suelo se debe dar con un enfoque interdisciplinario, incluyendo química, biología, física, génesis del suelo y taxonomía, además de la agricultura y prácticas de conservación, ya que son un recurso natural muy importante, son un medio para el crecimiento de las plantas, un regulador para el suministro de agua, un reciclador de materias primas, un hábitat para organismos, un medio de ingeniería y una interfaz ambiental (Brunelle 2020). Las investigaciones en suelos, continúa utilizando expertos capacitados tanto en ciencias del suelo como en campos relacionados con la amplia gama de problemas

que afectan al mundo como la biodiversidad, los biocombustibles, seguridad energética, el cambio climático, los servicios de los ecosistemas, la seguridad alimentaria, salud, degradación de la tierra y seguridad hídrica, cada uno de los cuales representa un desafío crítico para toda investigación que gire en torno a los suelos (Brevik *et al.* 2015).

En general, los suelos son una matriz muy compleja que incluye componentes físicos y componentes vivos que conducen a cambios constantes en su composición, por lo que su variabilidad puede ser un factor problemático (Brunelle 2020). Para solventar esto, los pedólogos utilizan el enfoque de pedón desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Morris *et al.* 2010). Un pedón según la taxonomía de suelos, se define como la unidad mínima de muestreo de un suelo, comprende 12 m² y se considera el cuerpo más pequeño de un suelo, pero lo suficientemente grande como para representar la naturaleza y disposición de los horizontes que lo conforman, e incorpora sus propiedades, las características del entorno, la vegetación, ente otras (Soil Survey Staff 1999). Otro concepto importante es el de polipedón, que es la unidad en que se integran suelos de propiedades y características homogéneas, lo suficientemente grande para exhibir todas las particularidades consideradas en su descripción y clasificación (Soil Survey Staff 1993). A nivel práctico, los científicos del suelo generalmente usan el pedón como el concepto central del polipedón, el cual es considerado como una unidad de mapeo de suelos, por tanto, el pedón es el prototipo del suelo, que se caracteriza y se mapea en el espacio (Morris *et al.* 2010).

Por una parte, las características físicas del suelo forman la base de varios procesos químicos y biológicos, que se ven afectados por el clima, el relieve y el uso de la tierra; las propiedades físicas del suelo definen el movimiento del aire, el agua y sustancias químicas disueltas a través del suelo, así como las condiciones que afectan la germinación, el crecimiento de las raíces y los procesos de erosión (Mangi *et al.* 2018). Por otra parte, comprender la química del suelo es de suma importancia, ya que es la base de la fertilidad y proporciona el conocimiento necesario para comprender las diferencias nutricionales entre diferentes suelos y su respuesta a la fertilización; y muchas veces, la parte química del suelo puede tener un impacto directo en las propiedades físicas (Disale *et al.* 2020). La fertilidad del suelo es una

cualidad que combina propiedades biológicas, químicas y físicas que afectan la disponibilidad de nutrientes; si bien la fertilidad del suelo es un aspecto importante para la productividad, desde el punto de vista del agricultor, la fertilidad química y la condición física de los suelos son determinantes, ya que ambos determinan el potencial de producción (Moral y Rebollo 2017).

En la actualidad, existe una demanda creciente de información sobre suelos, principalmente como medio para la producción de alimentos (Fasina *et al.* 2007). Realizar estudios de suelos proporciona la información básica necesaria para crear esquemas funcionales para su clasificación, y a la vez evaluar su fertilidad, con el fin de resolver algunos problemas únicos del suelo en su ecosistema (Lekwa *et al.* 2004). La combinación de la caracterización del suelo, la clasificación del suelo y el mapeo del suelo, proporciona un recurso poderoso para el beneficio de toda la humanidad, especialmente en el área de la seguridad alimentaria y sostenibilidad del medio ambiente. La caracterización del suelo proporciona la información que ayuda a la comprensión de sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas y microbiológicas, aspectos de los que dependemos para cultivar, sostener bosques y pastizales, así como sustentar hogares y estructuras sociales (Ogunkunle 2005). La clasificación del suelo contribuye a organizar el conocimiento, facilita la transferencia de experiencia y tecnología de un lugar a otro y ayuda a comparar las propiedades de los suelos.

Según Eswaram (1977), la caracterización de los suelos contribuye en su clasificación correcta, y a su vez permite que los científicos de suelos, los incluyan en sus taxonomías o sistemas de clasificación y sirvan como base para evaluaciones y generar conocimientos más detallados del suelo; así como para recopilar información sobre las limitaciones físicas, de nutrientes u otro tipo de información necesaria para producir una clase de capacidad de uso de los suelos (Esu 1991). Un estudio de caracterización del suelo, por lo tanto, es un componente importante para comprenderlo, clasificarlo y obtener la mejor comprensión del medio ambiente (Sharu *et al.* 2013).

Metodología

Área de estudio

El área de estudio se ubica al noroeste del Cantón Buenos Aires de Puntarenas, delimitada por los límites establecidos en la hoja cartográfica Buenos Aires (IGN 1980) y tomando en cuenta el mapa geológico de la hoja Buenos Aires, realizado por Obando y Kussmaul (2009) para definir los sitios de muestreo. Las elevaciones van desde los 360 m s. n. m. en Buenos Aires hasta los 2500 m s. n. m. en la parte alta de las estribaciones de la Cordillera de Talamanca; y según el sistema de zonas de vida de Holdridge se encuentran Bosque húmedo tropical y Bosque muy húmedo premontano (Delgado *et al.* 2011). En cuanto a la precipitación, se presenta una estación seca que inicia a finales de diciembre y termina alrededor de abril siendo febrero el mes más seco, el mes más lluvioso suele ser octubre en el que la precipitación puede llegar a los 3 500 mm. La temperatura media anual oscila entre los 28 °C y 34 °C. Los suelos se caracterizan por ser poco fértiles, con pendientes quebradas moderadas, erosionadas por el sobre pastoreo (INDER 2014).

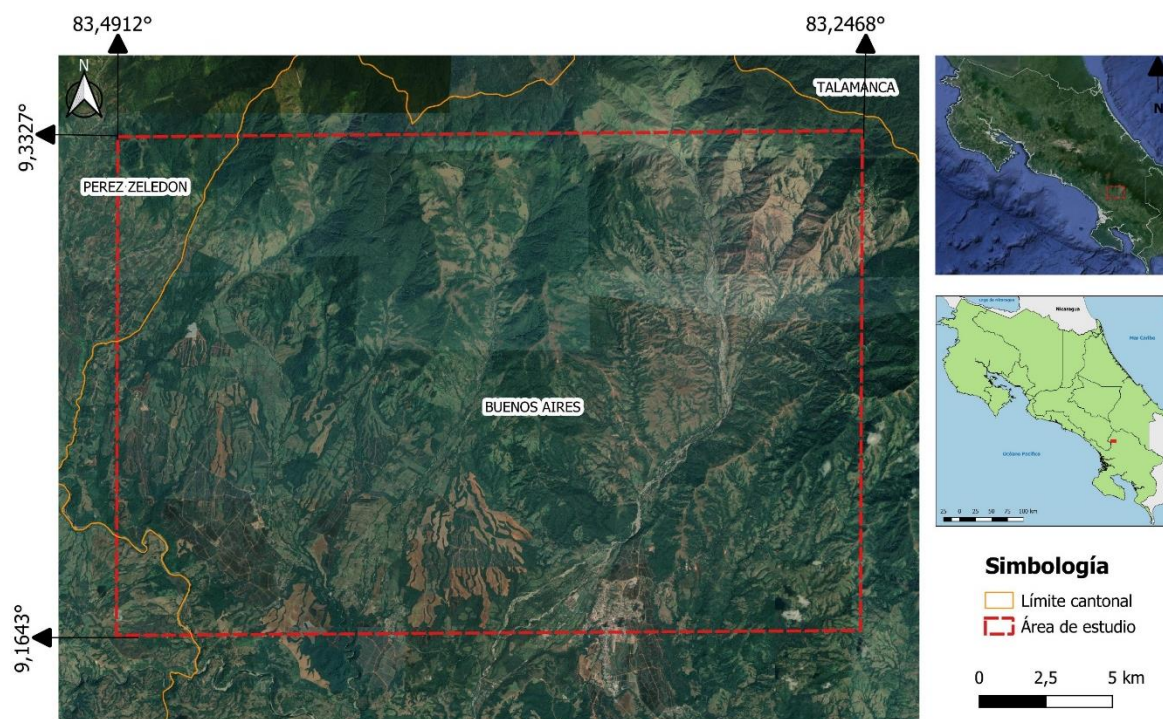


Figura 2.1. Área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas, (zona noreste del cantón de Buenos Aires y límite sureste con el cantón Pérez Zeledón), Costa Rica.

Trabajo de campo

El levantamiento de suelos se realizó por medio de transectos, compuestos por una serie de observaciones denominadas barrenadas simples o cateos de suelos de 120 cm de profundidad, realizadas con un barreno Edelman tipo holandés; teniendo como base los abanicos aluviales y materiales geológicos descritos por Obando y Kussmaul (2009) en el mapa geológico de la hoja Buenos Aires. En cada barrenada se georreferenció la ubicación con GPS, se separaron los horizontes genéticos del perfil del suelo y se caracterizó según su textura, color, entre otras características morfológicas del sitio utilizando el Field Book for Describing and Sampling Soils (Schoeneberger *et al.* 2012). Con estas observaciones se determinaron o escogieron los sitios de descripción de los pedones modales, donde se abrieron fosas de observación o calicatas para la descripción detallada del perfil modal del suelo. La calicata corresponde a una fosa de 1,5 m de ancho por 2,0 m de largo y 2,0 m de profundidad o hasta la profundidad a la que aparece la roca o bloques encamados, dejando siempre una cara para describir el perfil del suelo, la descripción del mismo se llevó a cabo siguiendo los lineamientos descritos en Schoeneberger *et al.* (2012). Se identificó cada horizonte y se caracterizó su espesor y profundidad, color en húmedo y en seco con una Tabla Munsell, estructura y consistencia, porosidad y contenido y distribución de raíces, así como formaciones especiales y se tomaron muestras para la caracterización física y química de cada uno de ellos (Schoeneberger *et al.* 2012).

Se describieron y muestrearon en total 22 calicatas en el área de estudio, las cuales representan los abanicos aluviales río San Juancito, río Convento, río Cacao, Cordoncillo, río Ángel, Llano Bonito, río Cañas, quebrada Juntas, quebrada Palma y Buenos Aires, y también los materiales intrusivos y abanicos del grupo granito-gabro Talamanca, así como materiales de la formación Curré. La distribución de las 22 calicatas en el área de estudio se muestra en la figura 2.2.

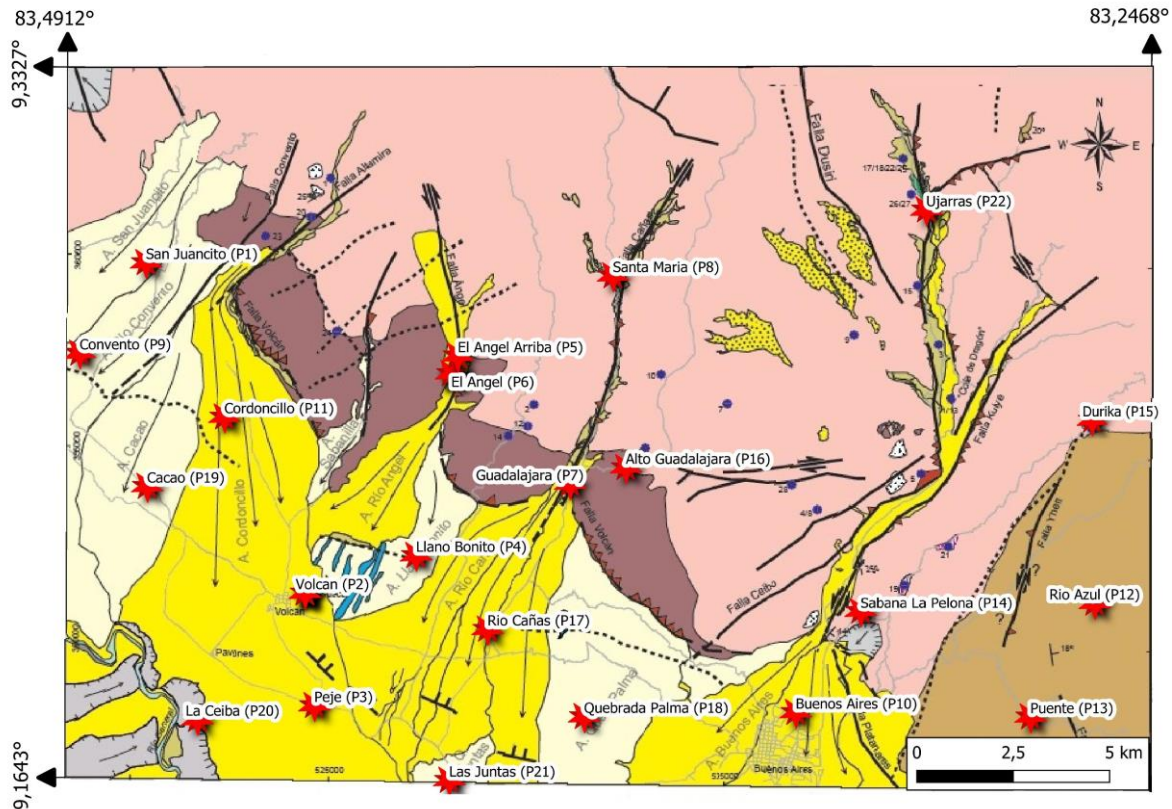


Figura 2.2. Mapa de ubicación de los perfiles modales realizados en el área de estudio.
Fuente: Mapa geológico de la hoja Buenos Aires (Obando y Kussmaul 2009).

Métodos de laboratorio para análisis de características físicas y químicas de suelo

Características físicas

Textura: Se determinó por el método de Bouyoucos modificado por Day (1965), en el que se pesaron 40 g de suelo que fue secado al aire entre 26 y 29 °C y tamizado a 2 mm y se colocaron en una botella con 100 ml de agua y 50 ml de una solución de Calgón (37,5 g de hexametáfosfato de sodio + 7,1 g de carbonato de sodio para 1000 ml de Calgón) y se pusieron en agitación por 16 horas. El contenido de la botella se trasvasó a una probeta de precipitación de 1000 ml y se aforó, se agitó el contenido y se realizó una lectura con un hidrómetro a los 40 segundos y otra lectura a las 2 horas (Forsythe 1985). Con estas lecturas se obtuvieron los porcentajes de arena, limo y arcillas y se definió la clase textural según el USDA (2012).

Densidad aparente: Se realizó con muestras de suelo no disturbado tomadas en cilindros de 5,1 cm de alto por 5,0 cm de diámetro, que se secaron a 105 °C por 24 h, y se tomó el peso del suelo seco en relación con el volumen total del cilindro ($\rho_a = m_s / V_t$, donde m_s es masa de suelo seco y V_t es volumen total) en g/cm^3 (Forsythe 1985).

Densidad de partículas: Se utilizó el método del picnómetro el cual permite determinar la relación entre la masa de suelo seco y el volumen de sólidos del suelo en un recipiente de volumen conocido ($\rho_s = m_s / V_s$, donde m_s es masa de suelo seco y V_s es volumen de sólidos) se expresó en g/cm^3 (Forsythe 1985).

Conductividad hidráulica: Se utilizaron muestras de suelo no disturbado de tomadas en cilindros de 5,1 cm de alto por 5,0 cm de diámetro, en las cuales se hizo pasar agua manteniendo una carga hidráulica constante en un permeámetro de suelos Eijkelkamp 09.02, para determinar el flujo de agua que pasa a través del suelo en cm/h (Forsythe 1985).

Retención de humedad: Se utilizaron muestras de suelo no disturbado tomadas en anillos de 1,0 cm de alto por 5,0 cm de diámetro, se pusieron a saturar con agua y se sometieron a potenciales de presión de 0,33 bar y 15 bar, se tomaron los pesos de las muestras estabilizadas a estas presiones y el contenido de agua se calculó en relación al peso de la muestra de suelo secada a 105 °C por 24 h (Forsythe 1985).

Características químicas

Acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$): Se usará una disolución de cloruro de potasio (KCl) para desplazar los iones de aluminio e hidronio. Esta acidez será luego titulada con una solución básica (Díaz-Romeu y Hunter 1978).

Determinación de Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Fe y Mn: Se utilizará una solución extractora de Olsen modificado a pH 8,5. El Ca y Mg se extrajeron en KCl y posteriormente se determinarán por espectrofotometría de absorción atómica. Metodología según LSF-CIA-UCR, basado en Soil Survey Staff (2006a).

pH en agua: Consiste en la determinación de la cantidad de iones hidronio en disolución de suelo. Se trabajó con una relación suelo: agua 1:2,5 utilizando un medidor de pH (Soil Survey Staff 2006).

Carbono orgánico: Se realizó con un autoanalizador por el método de combustión seca de Dumas (Elementar Analysensysteme GmbH 2009).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases (Ca, Mg, K y Na): Se extrajeron empleando acetato de amonio 1 N a pH 7. Las bases se analizaron por absorción atómica y la CIC por el Analizador de Inyección de Flujo (FIA) (Díaz-Romeu y Balerdi 1967).

Resultados

Descripción morfológica de los perfiles

San Juancito (P1)

El perfil San Juancito se encuentra ubicado en el abanico con el mismo nombre, la finca del Señor Mario Piedra, en San Pedro de Pérez Zeledón, dedicada al cultivo de café con sombra de árboles de cedro, en las coordenadas 9,2287999° latitud norte, 83,480418° longitud oeste, en una zona con relieve ondulado con una pendiente de 30 % y una altitud de 925 m s. n. m. El material parental corresponde a un aluvión del río Convento (Abanico San Juancito), el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, presentó un buen drenaje y una erosión moderada. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo rojizo oscuro (2.5 YR 2.5/4) a rojo (10 R 4/8), como se puede observar en el cuadro 1. El perfil se dividió en 6 horizontes, Ap de 0 a 25 cm de profundidad, AB de 25 a 40 cm, Bt1 de 40 a 78 cm, Bt2 de 78 a 110 cm, Bt3 de 110 a 170 cm y B/C de 170 a 225 cm. Los límites entre los horizontes Ap y AB, Bt1 y Bt2, y Bt3 y B/C fueron planos claros, y ondulado claro entre los horizontes AB y Bt1. Sus texturas al tacto fueron franco-arcillosa en los dos primeros horizontes y arcillosa en los otros cuatro horizontes. Los horizontes Ap y AB fueron ligeramente plásticos y ligeramente adherentes, y los cuatro restantes (Bt1, Bt2, Bt3 y B/C) muy adherentes y muy plásticos. La estructura en todos los horizontes fue blocosa subangular media, fina, y muy fina. De consistencia friable en húmedo desde el Ap hasta el horizonte Bt3 y firme en el horizonte B/C. En relación a los poros y raíces, el horizonte Ap mostró poros finos y muy

finos, comunes, los horizontes AB y Bt1 poros medios, finos y muy finos, comunes, el Bt2 poros gruesos, escasos, y los horizontes Bt3 y B/C poros, gruesos y medios, comunes, y finos y muy finos, escasos; las raíces fueron gruesas, escasas, medias, comunes y finas y muy finas, abundantes en el horizonte Ap, gruesas, comunes y finas y muy finas, escasas en el AB, medias, finas y muy finas, comunes en el Bt1, medias, escasas, finas y muy finas, comunes en el Bt2 y Bt3, y medias, finas y muy finas escasas, en el horizonte B/C. Los horizontes AB y Bt1 presentaron cutanes espesos y continuos.



Figura 2.3. Perfil San Juancito (P1) clasificado como Humic Rhodic Kandiuustox y paisaje correspondiente al cultivo de café en asocio con cedro.

Volcán (P2)

El perfil Volcán se encuentra ubicado en la parte media del Abanico Cordoncillo, y se realizó en el aparto 18 de la finca del Señor Alfonso Beita, en Volcán de Buenos Aires, y se encuentra ubicado en la parte media del Abanico Cordoncillo, en las coordenadas 9,20925° latitud norte, 83,44338° longitud oeste, en una zona con relieve plano con una pendiente de 3 % y una altitud de 409 m s. n. m. El material parental corresponde a un aluvión del río Volcán, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, buen drenaje, con erosión moderada y un 15 % de pedregosidad superficial. El color en húmedo de sus horizontes va de rojizo oscuro (2.5 YR 3/4) a pardo rojizo oscuro (5 YR 3/6). El perfil se dividió en 4 horizontes,

Ap de 0 a 20 cm de profundidad, Bt1 de 20 a 50 cm, Bt2 de 50 a 70 cm y B/C de 70 a 170 cm donde se llegó a un contacto lítico. Los límites entre los horizontes Ap y Bt1, y Bt1 y Bt2 fueron planos y graduales, y ondulado y claro entre los horizontes Bt2y B/C. Sus texturas al tacto fueron franco arcilloso en el Ap y arcillosa en los demás horizontes. El horizonte Ap fue ligeramente plástico y adherente y los horizontes Bt1, Bt2 y B/C moderadamente adherentes y moderadamente plásticos. Con estructura de bloques subangulares media y fina, de grado de desarrollo moderado en todos los horizontes. De consistencia en húmedo friable en el horizonte Ap y firme en los horizontes subsuperficiales. Los poros observados fueron medios, finos y muy finos comunes, en el primer horizonte, y finos y muy finos, comunes en los horizontes subsuperficiales; las raíces fueron finas y muy finas, abundantes en el horizonte Ap, gruesas, medias, finas y muy finas, escasas en el Bt1, y finas y muy finas, escasas en los horizontes Bt2 y B/C. El horizonte Bt1 presentó rocas con pátinas de manganeso y el horizonte B/C presentó entre un 25 % y un 35 % de rocas de entre 18 cm y 28 cm de diámetro.

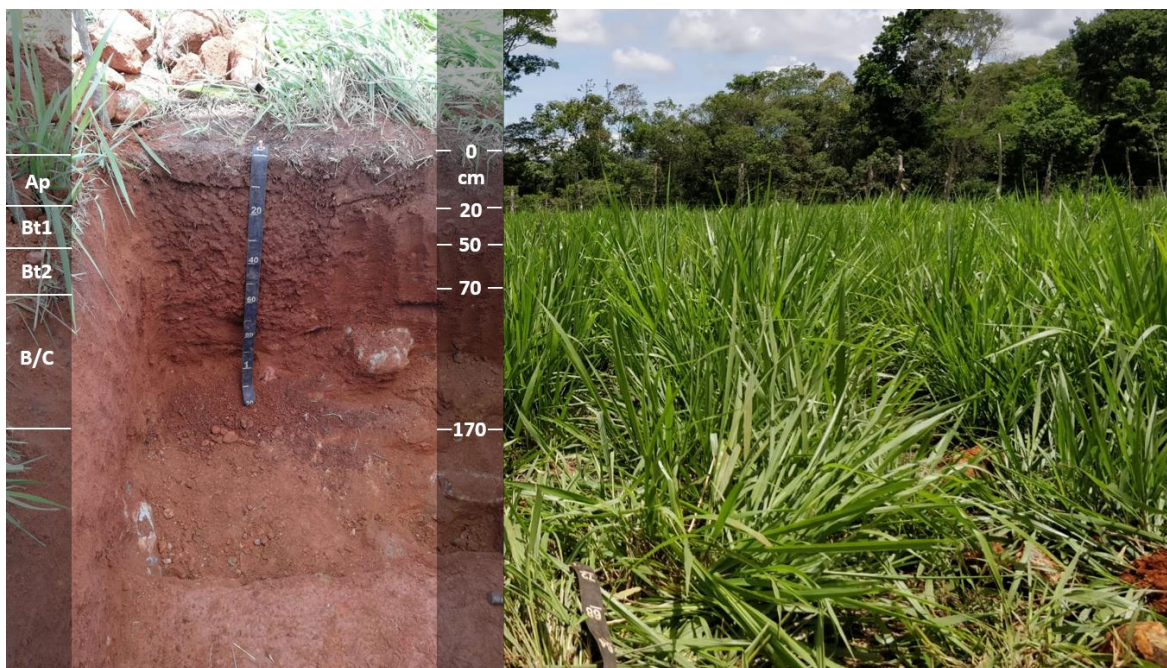


Figura 2.4. Perfil Volcán (P2), correspondiente a un Lithic Kandustox en una finca dedicada a pastos y ganado vacuno.

Peje (P3)

El perfil Peje se realizó en la finca del Señor Walter Concepción, en Peje de Buenos Aires, se encuentra ubicado en la parte baja del Abanico Cordoncillo, en las coordenadas 9,182399°

latitud norte, 83,441197° longitud oeste una altitud de 429 m s. n. m., en una zona con relieve plano con una pendiente de 3 %, dedicada al cultivo de yuca. El material parental corresponde a un aluvión del río Volcán, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, presentó un buen drenaje y una erosión moderada. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo rojizo (5 YR 4/4) a pardo rojo (2.5 YR 4/8). El perfil se dividió en 5 horizontes, Ap de 0 a 24 cm de profundidad, BA de 24 a 36 cm, Bt1 de 36 a 89 cm, Bt2 de 89 a 155 cm y Cv de 155 a 230 cm. Los límites entre todos los horizontes fueron planos y claros. Sus texturas fueron arcillosas al tacto, estructura de bloques subangulares media, moderada en el horizonte Ap y BA, estructura de bloques subangulares fina, moderada en el horizonte Bt1, estructura de bloques subangulares media y fina, con grado de desarrollo moderado en el horizonte Bt2 y estructura masiva en el horizonte Cv; consistencia en húmedo firme en el primer horizonte, muy firme en el segundo, cuarto y quinto horizonte, y ligeramente rígido en el horizonte Bt1; moderadamente plástico y moderadamente adherente en el horizonte Ap, BA y Cv, y muy adherente y muy plástico en los horizontes Bt1 y Bt2. Los poros observados fueron finos y muy finos, abundantes en el primer horizonte, medios, finos y muy finos, comunes en los horizontes BA y Bt1, medios, escasos, finos y muy finos, comunes en el Bt2, y finos y muy finos, escasos en el Cv; las raíces fueron medias, finas y muy finas, comunes en el Ap, del mismo tipo en el BA y Bt1, pero escasas, y ausentes en los horizontes Bt2 y Cv. El horizonte Ap presentó cutanes espesos y discontinuos, mientras que los horizontes BA, Bt1 y Bt2 presentaron cutanes espesos y continuos. El horizonte Cv presentó nódulos de limonita y hematita, y principios de formación de plintita.

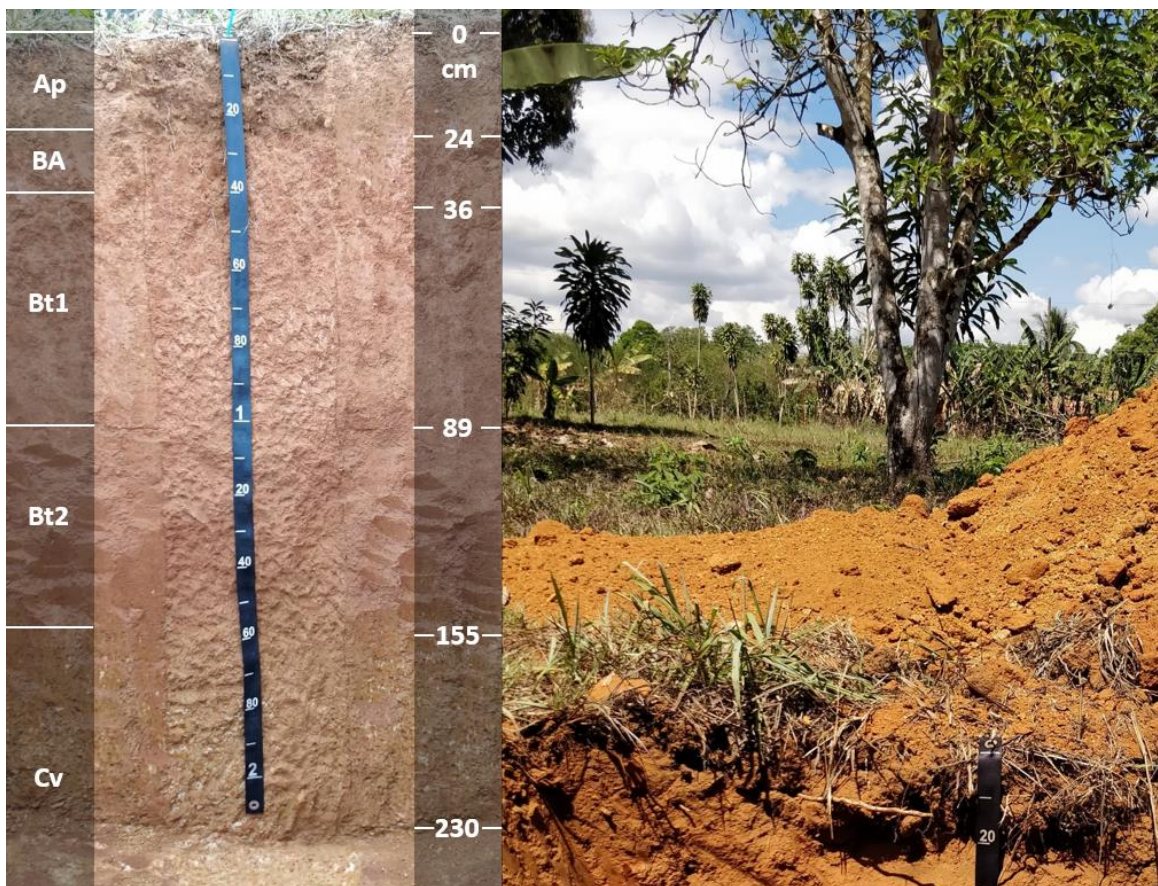


Figura 2.5. Perfil Peje (P3) clasificado como Typic Kandiuustox, ubicado en una finca de relieve plano y dedicada al cultivo de yuca.

Llano Bonito (P4)

El perfil de Llano Bonito es representativo del Abanico Llano Bonito, se realizó en terrenos dedicados al cultivo de piña por parte de la compañía PINDECO en Buenos Aires, en las coordenadas 9,218179° latitud norte, 83,417484° longitud oeste, en una zona con relieve ligeramente ondulado con una pendiente de 8 % y a una altitud de 576 m s. n. m.. El material parental corresponde a un aluvión del río El Ángel, el nivel freático se encuentra a más de 3 m de profundidad, presenta un drenaje bueno, es ligeramente pedregoso con 3 % de roca superficial y presentó una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de rojo amarillento (5 YR 4/6) a pardo amarillento oscuro (10 YR 4/8). El perfil se dividió en 5 horizontes, Ap de 0 a 15 cm de profundidad, BA de 15 a 39 cm, Bt de 39 a 87 cm, Bt/C de 87 a 164 cm y Cr/Bt de 164 a 300 cm. Los límites entre los horizontes Ap y BA, BA y Bt fueron planos y claros, planos y graduales entre los horizontes Bt y Bt/C, Bt/C y Cr/Bt Sus texturas al tacto fueron arcillosas. Todos los horizontes fueron moderadamente plásticos y

moderadamente adherentes. Con estructura granular muy fina de grado moderado en el horizonte Ap, de bloques subangulares medios, finos y muy finos de grado moderado en el horizonte BA, bloques subangulares finos moderados en el horizonte Bt, de bloques subangulares finos y medios moderados en el horizonte Bt/C y masiva en el horizonte Cr/Bt. La consistencia en húmedo en húmedo fue muy firme en el primer y tercer horizonte, friable en el horizonte BA, y extremadamente dura en el horizonte Bt/C. Los poros observados fueron gruesos, medios, finos y muy finos, abundantes en el horizonte A y BA, gruesos, medios, finos y muy finos, comunes en el horizonte Bt, y finos y muy finos, comunes en el Bt/C, y ausentes en el horizonte Cr/Bt; las raíces fueron finas y muy finas, abundantes en los horizontes Ap, BA y Bt, finas y muy finas, comunes en el Bt/C, y ausentes en el horizonte Cr/Bt. En el horizonte Ap se detectó la presencia de gravas, cutanes delgados continuos en el horizonte BA, cutanes espesos y continuos en el Bt y Bt/C, el horizonte Bt/C presentó un 10 % de rocas meteorizadas.

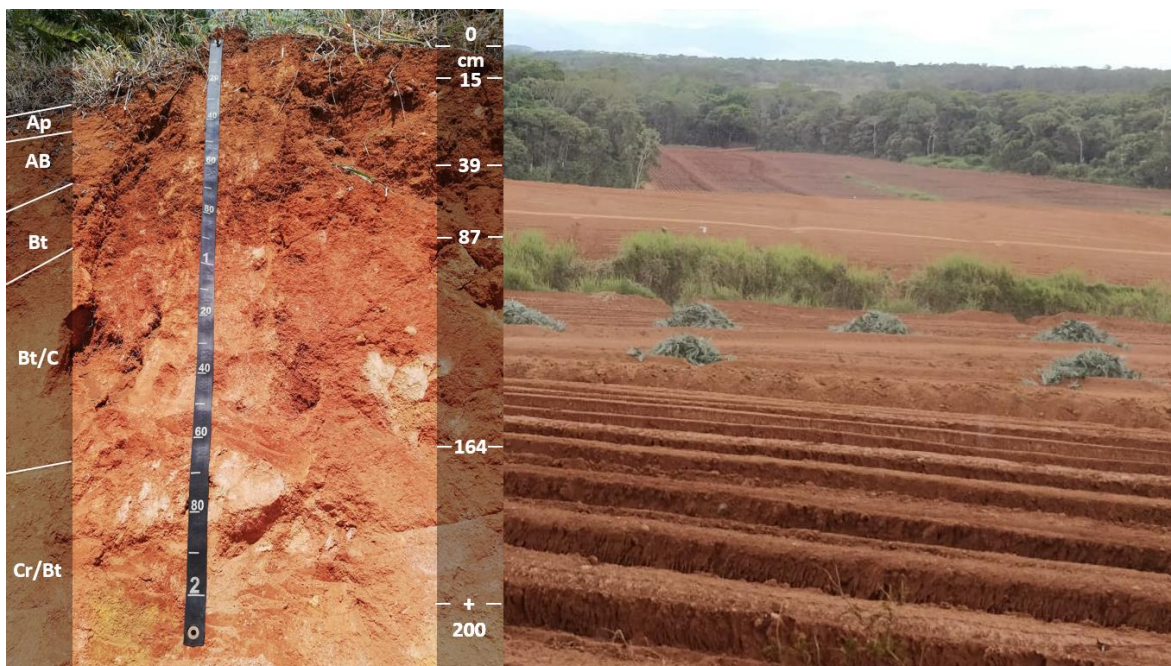


Figura 2.6. Perfil Llano Bonito (P4) clasificado como Lithic Kandistox, ubicado en terrenos preparados para el cultivo de piña.

El Ángel Arriba (P5)

El perfil de El Ángel Arriba se realizó en la parte alta del Abanico río Ángel, en terrenos propiedad del Señor Alfonso Beita, dedicados a pastos, en las coordenadas 9,264856° latitud norte, 83,407158° longitud oeste, en una zona con relieve moderadamente ondulado con una

pendiente de 15 % y una altitud de 908 m s. n. m. El material parental corresponde a un aluvión del río El Ángel, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, erosión leve y un 15 % de pedregosidad superficial. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo rojizo oscuro (5 YR 3/2) a pardo oscuro (7.5 YR 2.5/2). El perfil se dividió en 3 horizontes, Ap de 0 a 15 cm de profundidad, A2 de 15 a 35 cm, C/A de 35 a 50 cm con límites planos y claros. Sus texturas fueron franco-arcillosa en el horizonte A y franco-arenosa y en los horizontes A2 y C/A y fueron ligeramente adherentes y ligeramente plásticos. Con estructura de bloque subangulares medios, finos y muy finos de grado de desarrollo débil en los tres horizontes y consistencia en húmedo fue friable para todos horizontes. Los poros observados fueron finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap, medios, escasos, finos, abundantes y muy finos, comunes en el horizonte A2 y medios, finos y muy finos, escasos en el horizonte C/A; las raíces fueron medias, finas y muy finas, abundantes en el horizonte Ap, gruesas escasas, medias y muy finas, comunes en el horizonte A2 y muy gruesas, medias y muy finas, escasas en el C/A. El horizonte Ap presentó un 10 % de rocas, el horizonte A2 un 15 % y el horizonte C/A un 80 %. Se realizó la prueba con fluoruro de sodio (NaF) con resultados positivos, lo que indica la posible presencia de ceniza volcánica en este suelo.

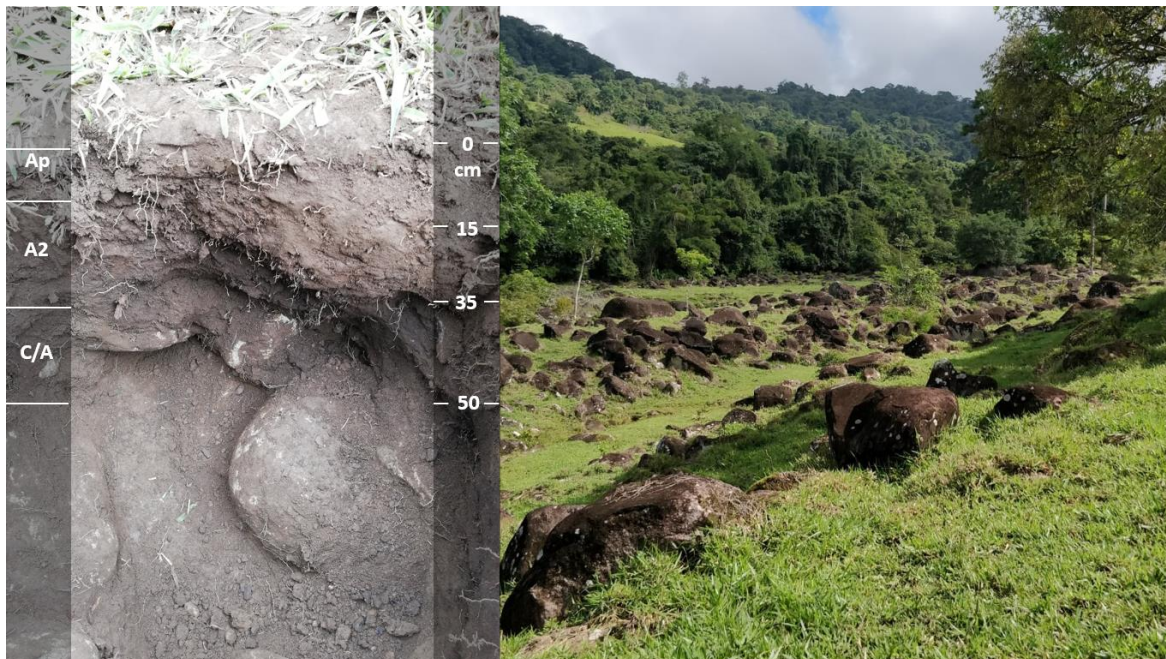


Figura 2.7. Perfil El Ángel Arriba (P5) clasificado como Vitrandic Ustorthent, y detalle de rocas superficiales y relieve moderadamente ondulado.

El Ángel (P6)

El perfil de El Ángel se realizó en terrenos dedicados a pastos, propiedad del Señor Alfonso Beita, y se encuentra ubicado en la parte alta del Abanico río Ángel, en las coordenadas 9,261562° latitud norte, 83,409270° longitud oeste, en una zona con relieve moderadamente ondulado con una pendiente de 10 % y una altitud de 881 m s. n. m. El material parental corresponde a un aluvión del río El Ángel, el nivel freático se encuentra a más de 4 m de profundidad, presenta un drenaje bueno y una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo oscuro (7.5 YR 4/4) a rojo (2.5 YR5 /8). El perfil se dividió en 6 horizontes, Ap de 0 a 15 cm de profundidad, AB de 15 a 40 cm, Bt de 40 a 70 cm, BC de 70 a 160 cm, C de 160 a 200 cm y Cr de 200 a 400 cm. Los límites entre todos los horizontes fueron planos y claros. Sus texturas fueron arcillosas, ligeramente adherente y ligeramente plástico en todos los horizontes. Con estructura de bloques subangulares media, fina y muy fina de grado de desarrollo débil en los cuatro horizontes superiores, y masiva en el horizonte C, y consistencia en húmedo firme en todos los horizontes. Los poros observados fueron gruesos, medios, finos y muy finos abundantes, en el horizonte Ap, medios, finos y muy finos, abundantes en el horizonte AB, finos y muy finos, comunes en el horizonte Bt, finos y muy finos, escasos en el BC y medios, finos y muy finos, comunes en el horizonte C; las raíces fueron finas y muy finas, abundantes en el horizonte Ap, finas y muy finas, comunes en el horizonte AB, finas y muy finas, escasas en el Bt, finas y muy finas, comunes en el BC y estuvieron ausentes en el horizonte C. Los horizontes Bt y BC presentaron cutanes delgados discontinuos.



Figura 2.8. Perfil El Ángel (P6) clasificado como Humic Kandiustox y paisaje asociado a su ubicación en el ápice del río Ángel.

Guadalajara (P7)

El perfil de Guadalajara se encuentra ubicado en la parte media del Abanico río Cañas, se realizó en terrenos cubiertos con pastos, propiedad de Roger Delgado, en las coordenadas 9,235361° latitud norte, 83,381582° longitud oeste, a una altitud de 730 m s. n. m., en una zona con relieve moderadamente ondulado con una pendiente de 10 %. El material parental corresponde a un aluvión del río Cañas, el nivel freático se encuentra a más de 3 m de profundidad, presentan un drenaje bueno, un 10 % de pedregosidad superficial y una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo oscuro (7.5 YR 4/6) a rojo (10 R 4/8). El perfil se dividió en 5 horizontes, Ap de 0 a 10 cm de profundidad, Bt/A de 10 a 42 cm, Bt1 de 42 a 72 cm, Bt2 de 72 a 112 cm y Bt3 de 112 a 190 cm. Los límites entre todos los horizontes fueron planos y claros. Sus texturas fueron arcillosas en todos los horizontes y moderadamente adherentes y moderadamente plásticos. Con estructura de bloques subangulares finos grado de desarrollo moderado en los dos primeros horizontes, de bloques subangulares medios de grado moderado en los siguientes tres horizontes. De consistencia en húmedo muy firme en el horizonte Ap, extremadamente fuerte en los horizontes Bt/A, Bt2 y Bt3, y ligeramente rígido en el horizonte Bt/A. Los poros observados fueron gruesos, medios, finos y muy finos, comunes en el horizonte Ap, gruesos, finos y muy finos, comunes

en el horizonte Bt/A, finos y muy finos, comunes en el horizonte Bt1, finos y muy finos, escasos en el Bt2, y muy finos, escasos en el horizonte Bt3; las raíces fueron gruesas, finas y muy finas, abundantes en el horizonte Ap, gruesas, escasas, medias, finas y muy finas, abundantes en el horizonte Bt/A, gruesas, escasas, finas y muy finas, abundantes en el horizonte Bt1, gruesas, finas y muy finas, escasas en el horizonte Bt2, y finas y muy finas, escasas en el horizonte Bt3. Presentó cutanes delgados discontinuos en el horizonte Bt/A, cutanes espesos continuos en los horizontes Bt1, Bt2 y Bt3, los mismos horizontes presentaron 5 %, 10 % y 30 % de rocas respectivamente.

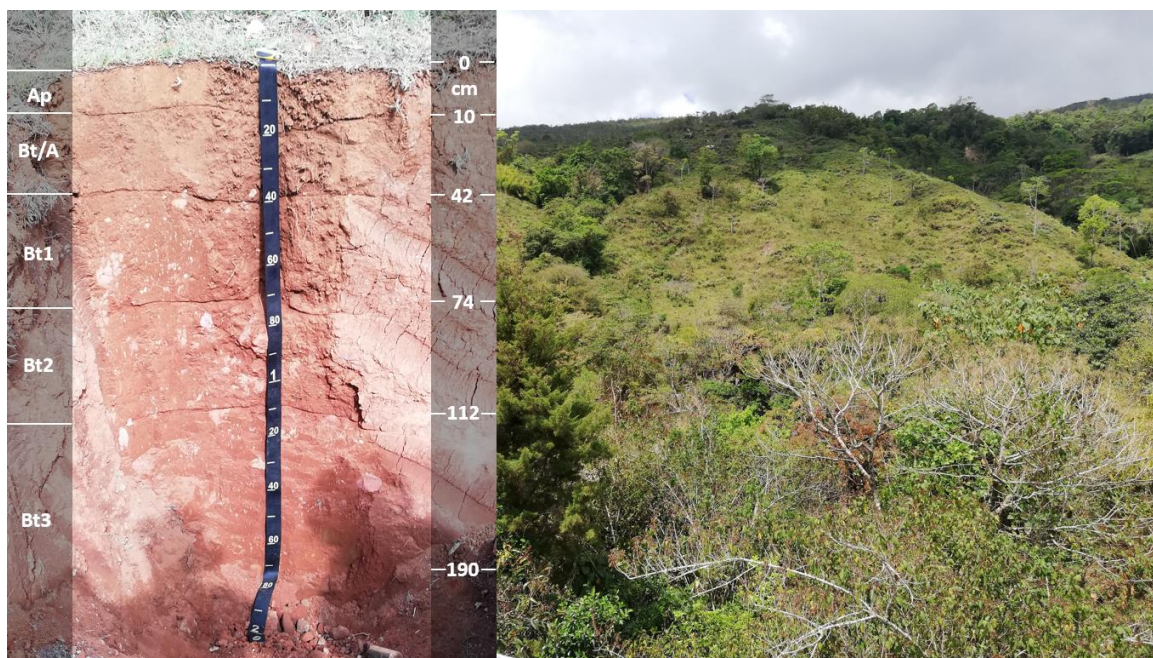


Figura 2.9. Perfil Guadalajara (P7) correspondiente a un Humic Acrustox y paisaje asociado a su ubicación en la parte media del Abanico río Cañas.

Santa María (P8)

El perfil de Santa María se realizó en el ápice del Abanico río Cañas, en las coordenadas 9,284868° latitud norte, 83,371583° longitud oeste, a una altitud de 1124 m s. n. m., en una finca cubierta con pastos y con relieve ondulado con una pendiente de 30 %, con un 5 % de pedregosidad superficial, un buen drenaje, una erosión fuerte y el nivel freático se encuentra a más de 3 m de profundidad. El material parental corresponde a un aluvión del río Cañas. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2) a pardo (10 YR 5/3). El perfil se dividió en 5 horizontes, A de 0 a 35 cm de profundidad, C/A de 35 a 100 cm, C2/A de 100 a 150 cm, C3/A de 150 a 200 cm y CR de 200 a 300 cm. El límite

entre el horizonte A y C/A fue claro y quebrado, y gradual y quebrado entre los horizontes C/A y C2/A, C2/A y C3/A, y C3/A y Cr. Sus texturas al tacto fueron francas en los dos primeros horizontes y franco-arcillo arenosa en los tres horizontes inferiores; todos los horizontes fueron ligeramente adherentes y ligeramente plásticos. Con estructura granular, fina, grado de desarrollo moderado en los primeros cuatro horizontes y sin estructura en el quinto horizonte. De consistencia en húmedo, friable en todos los horizontes. Los poros observados fueron gruesos y medios, comunes, finos y muy finos, abundantes en los horizontes cuatro primeros horizontes; las raíces fueron gruesas, comunes, finas y muy finas, abundantes en el horizonte A, medias, finas y muy finas, escasas en el horizonte C/A y ausentes en los horizontes C2/A y C3/A. El horizonte C/A presentó un 75 % de rocas y el horizonte C2/A presentó un 60 % de rocas.



Figura 2.10. Perfil Santa María (P8) clasificado como Typic Ustorthents y paisaje asociado a su ubicación en el ápice del río Cañas, en un área de relieve ondulado.

Convento (P9)

El perfil de Convento es representativo del abanico que lleva el mismo nombre, se ubica en las coordenadas 9,266416° latitud norte, 83,495866° longitud oeste, en un área cultivada con café, de relieve ligeramente ondulado con una pendiente de 8 % y una altitud de 660 m s. n. m. El material parental corresponde a un aluvión del río Convento, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, presenta un buen drenaje, 8 % de pedregosidad

superficial, el color en húmedo de sus horizontes va de pardo rojizo oscuro (5 YR 3/4) a rojo (2.5 YR 4/6) y presenta una erosión moderada. Este perfil se dividió en 4 horizontes, Ap de 0 a 20 cm de profundidad, Bt1 de 20 a 47 cm, Bt2 de 47 a 140 cm y B/C de 147 a 200 cm, sus límites fueron claros y planos. Todos los horizontes presentaron texturas arcillosas al tacto, además que el horizonte B/C contaba con la presencia de gravilla; siendo moderadamente adherente muy plástico el horizonte Ap, muy adherente y muy plástico los horizontes Bt1 y Bt2 y ligeramente adherente y no plástico el horizonte B/C; con estructura de bloques subangulares, fina de grado de desarrollo moderado en el primer horizonte, media de grado moderado en el segundo y tercer horizonte, y gruesa de grado débil el último horizonte. De consistencia en húmedo friable en el horizonte Ap, firme en los horizontes Bt1 y Bt2, y ligeramente rígido el B/C. Los poros observados fueron finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap, finos, abundantes en el Bt1, finos, comunes en el Bt2 y B/C; las raíces fueron finas, comunes en el horizonte Ap, muy finas, escasas en el horizonte Bt1 y ausentes en los horizontes Bt2 y B/C. Se presentó un 2 % de gravas y cutanes delgados discontinuos en el horizonte Bt1 y un 8 % de grava y cutanes espesos continuos en el horizonte Bt2.

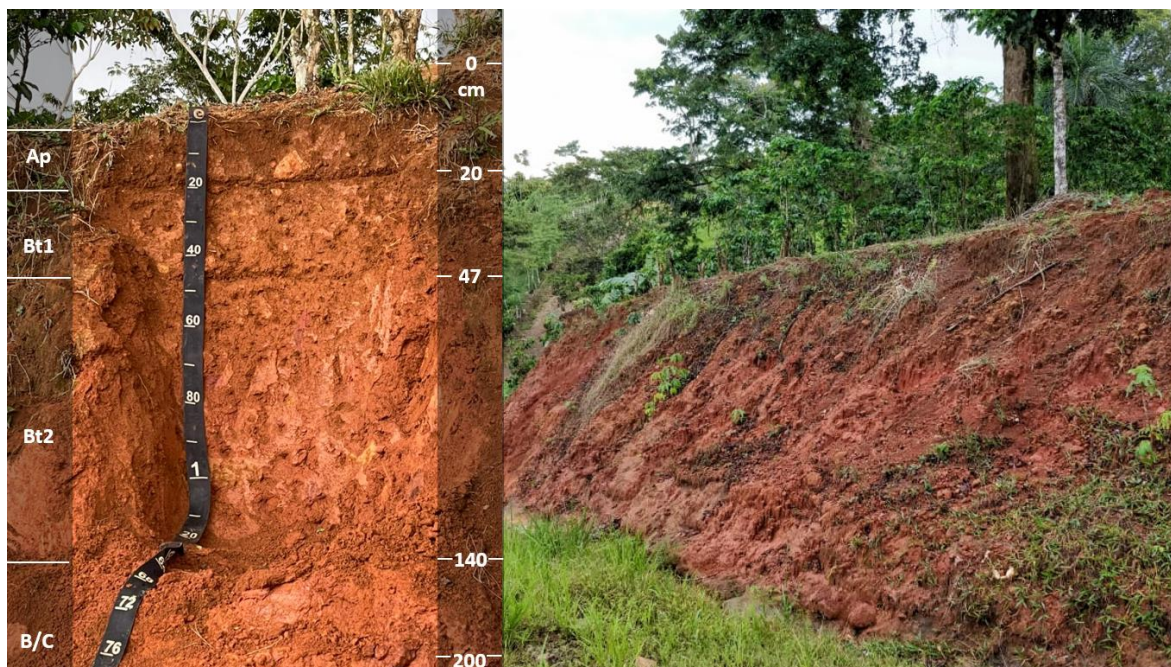


Figura 2.11. Perfil Convento (P9) clasificado como Humic Rhodic Acrustox, ubicado en un área cultivada con café y relieve ligeramente ondulado.

Buenos Aires (P10)

El perfil Buenos Aires se ubica en la parte baja del abanico Buenos Aires en las coordenadas 9,180770° latitud norte, 83,328998° longitud oeste, a una altitud de 399 m s. n. m., en un área con vegetación natural de sabana, de relieve ligeramente ondulado con una pendiente de 5 % y con una erosión severa y un 1 % de predregosidad superficial. El material parental corresponde a un aluvión del río Ceibo, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, es bien drenado. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4) a rojo (2.5 YR 3/6). Este perfil se dividió en 8 horizontes, Ap de 0 a 10 cm de profundidad, AB de 10 a 24 cm, Bt1 de 24 a 70 cm, Bt2 de 70 a 10 cm, Bt3 de 120 a 150 cm, Bt4 de 150 a 180, BC de 180 a 220 y BCr de 220 a 240 cm, los límites entre sus horizontes fueron claros y planos. Todos los horizontes presentaron texturas arcillosas al tacto y fueron moderadamente adherentes y muy plásticos; con estructura de bloques subangulares, fina, media y gruesa de grado de desarrollo moderado. De consistencia en húmedo friable en los horizontes Ap y AB, firme en los horizontes Bt1, Bt2 y Bt3, y muy firme el resto de los horizontes. Los poros observados fueron finos y muy finos, comunes en los primeros 4 horizontes del perfil, y muy finos, escasos en los demás horizontes; las raíces fueron medias, finas y muy finas, comunes en el horizonte Ap, finas y muy finas, comunes en los horizontes AB y Bt1, muy finas, escasas en el horizonte Bt2 y ausentes en los siguientes horizontes. Los horizontes Bt1 y Bt2 presentaron cutanes espesos continuos y los horizontes Bt3 y Bt4 mostraron presencia de pseudoarenas.

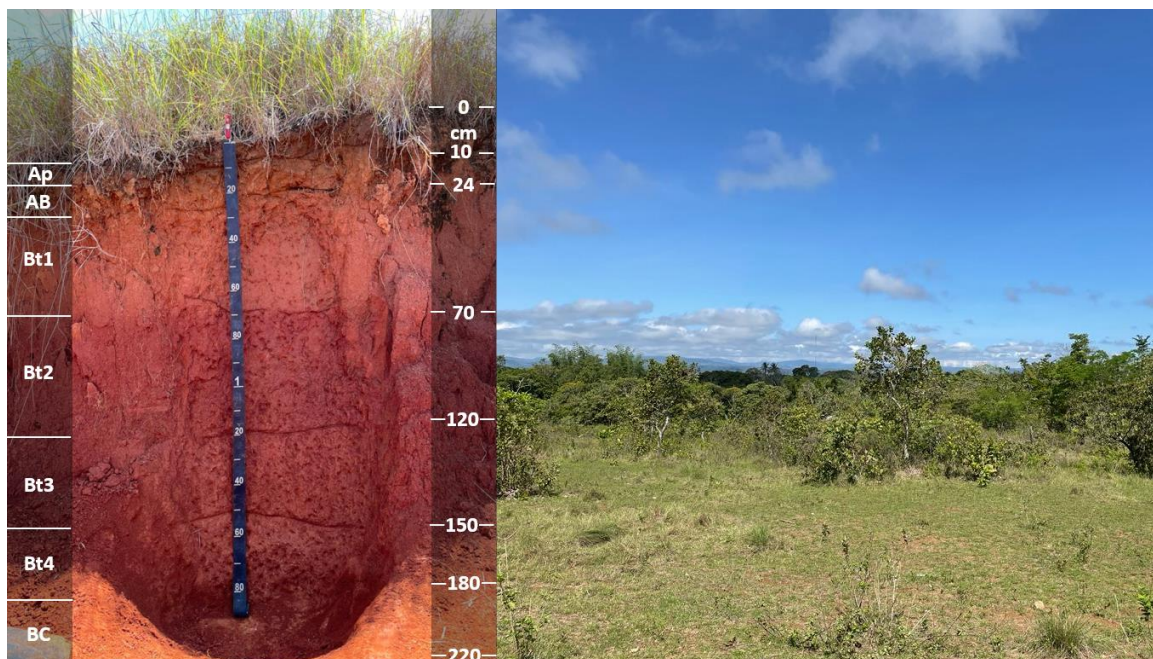


Figura 2.12. Perfil Buenos Aires (P10) clasificado como Rhodic Kandistox y paisaje asociado a su ubicación, correspondiente a vegetación de sabana con un relieve ligeramente onulado.

Cordoncillo (P11)

El perfil de Cordoncillo es representativo del abanico con el mismo nombre, se ubica en las coordenadas 9,251195° latitud norte, 83,462127° longitud oeste, a una altitud de 634 m s. n. m., en un área cubierta con pastos y árboles de naranja dispersos, con una pendiente de 2 % de relieve plano o casi plano. El material parental corresponde a un aluvión del río Cacao, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee un buen drenaje, presenta un 2 % de pedregosidad superficial y una erosión moderada. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo rojizo oscuro (5 YR 3/7) a rojo (2.5 YR 4/8). El perfil se dividió en 5 horizontes, Ap de 0 a 35 cm de profundidad, Bt1 de 35 a 60 cm, Bt2 de 60 a 110 cm, Bt3 de 110 a 148 cm y BC de 148 a 200 cm. Los límites entre los horizontes Ap y Bt1, y Bt2 y Bt3 fueron planos y graduales, y planos graduales entre los horizontes Bt1 y Bt2, y Bt3 y BC. Sus texturas al tacto fueron franco-arcillosas en los dos primeros horizontes y arcillosas en los tres horizontes inferiores. Moderadamente plásticos los horizontes Ap y Bt1 y muy plástico los horizontes Bt2, Bt3 y BC, mientras que moderadamente adherentes los horizontes Ap, Bt1 y Bt2, y muy adherentes los horizontes Bt3 y BC. Presentó estructura de bloques subangulares, media y fina de grado de desarrollo moderado en el primer horizonte, media

de grado moderado en los horizontes Bt1, Bt2 y Bt3, y gruesa de grado débil en el horizonte BC. De consistencia en húmedo friable en los primeros 4 horizontes, y muy firme el último. Los poros observados fueron gruesos, medios, finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap, gruesos, comunes y finos y muy finos, abundantes en el Bt1, gruesos, escasos y finos y muy finos, abundantes en el Bt2 y Bt3, y gruesos, escasos y finos y muy finos, comunes en el BC; las raíces fueron gruesas, medias, finas y muy finas, abundantes en el Ap, finas y muy finas, comunes en el Bt1 y Bt2, finas y muy finas, escasas en el horizonte Bt3 y ausentes en el horizonte BC. Los horizontes Ap y Bt1 presentaron un 2 % de pedregosidad, 5 % el horizonte Bt2, 4 % el horizonte Bt3 y un 25 % de pedregosidad el horizonte BC.

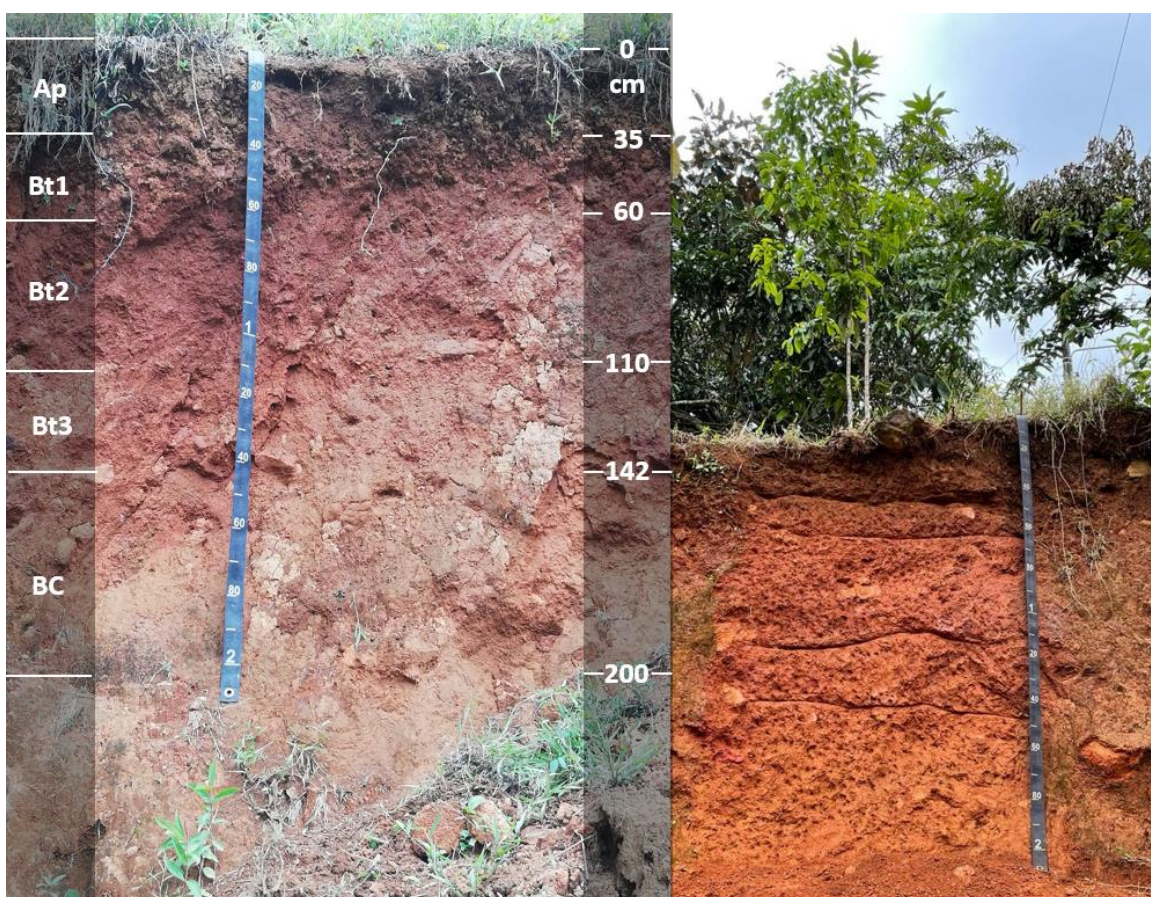


Figura 2.13. Perfil Cordoncillo (P11) clasificado como Humic Rhodic Kandistox, ubicado en un área cubierta con pastos y árboles de naranja dispersos, de relieve plano o casi plano.

Río Azul (P12)

El perfil río Azul es representativo de la Formación Curré se ubica en las coordenadas 9,206746° latitud norte, 83,259277° longitud oeste, a una altitud de 761 m s. n. m., en un área

cubierta con pastos y helechos, con una pendiente de 25 % y relieve ondulado. El material parental corresponde a una terraza aluvial del río Platanares, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee drenaje moderado y una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo rojizo oscuro (5 YR 3/4) a rojo oscuro (2.5 YR 3/6). El perfil se dividió en 5 horizontes, Ap de 0 a 17 cm de profundidad, Bt1 de 17 a 82 cm, Bt2 de 82 a 130 cm, Bt3 de 130 a 180 cm y BC de 180 a 200 cm. Los límites entre los horizontes Ap y Bt1, y Bt3 y BC fueron planos y claros, y ondulado gradual entre los horizontes Bt2 y Bt3. Sus texturas al tacto fueron arcillosas en los cuatro primeros horizontes y arcillo-limosa en el último horizonte. Los horizontes Ap, Bt1 y BC fueron moderadamente plásticos y moderadamente adhesivos, mientras que los horizontes Bt2 y Bt3 fueron muy plásticos y muy adhesivos. El horizonte Ap presentó estructura de bloques subangulares finos de grado de desarrollo moderado, en los horizontes Bt1, Bt2 y Bt3, y bloques subangulares fueron de tamaño medio de grado moderado y finos de grado débil en el horizonte BC. De consistencia en húmedo friable en el primero horizonte y firme en los otros cuatro. Los poros observados fueron gruesos, medios, finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap, medios, finos y muy finos, comunes en el Bt1, finos y muy finos, comunes en los Bt2, Bt3 y BC; las raíces fueron medias, finas y muy finas, abundantes en el Ap, medias, finas y muy finas, comunes en el Bt1, finas y muy finas, comunes en los horizontes Bt2, Bt3 y BC. El horizonte BC presentó un 25 % de pedregosidad, con rocas muy alteradas de diferentes tamaños.

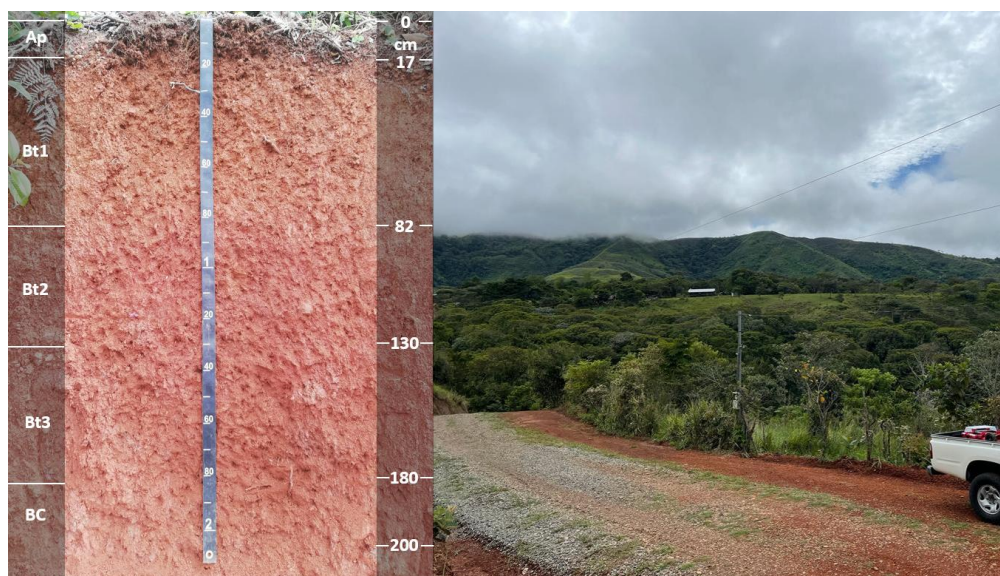


Figura 2.14. Perfil río Azul (P12) clasificado como Typic Kandiuustox y paisaje asociado a su ubicación en un área de relieve ondulado cubierta con pastos y helechos.

Puente (P13)

El perfil de Puente se ubica en la parte media de la Formación Curré, en las coordenadas 9,179693° latitud norte, 83,274293° longitud oeste, a una altitud de 562 m s. n. m., en un área cubierta con pasto, con una pendiente de 6 % y relieve ligeramente ondulado. El material parental corresponde a una terraza aluvial del río Platanares, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee buen drenaje y una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo oscuro (7.5 YR 3/4) a pardo fuerte (7.5 YR 4/8). El perfil se dividió en 5 horizontes, Ap de 0 a 10 cm de profundidad, Bt1 de 10 a 37 cm, Bt2 de 37 a 68 cm, Bt3 de 68 a 124 cm y BC de 124 a 180 cm. Los límites entre los horizontes Ap y Bt1, Bt1 y Bt2, Bt2 y Bt3 y BC fueron planos y graduales, y ondulado gradual entre los horizontes Bt3 y BC. Sus texturas al tacto fueron arcillosas en los cinco horizontes y todos fueron ligeramente plásticos y ligeramente adhesivos. Los horizontes Ap, Bt1 y Bt2 presentaron estructura en forma de bloques subangulares, finos de grado de desarrollo moderado, y de bloques subangulares, finos de grado débil en los horizontes Bt3 y BC. De consistencia en húmedo friable en el primer y último horizonte y firme en los otros tres. Los poros observados fueron medios, finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap; medios, finos y muy finos, comunes en el horizonte Bt1 y Bt2, y finos y muy finos, abundantes en los horizontes Bt3 y BC; las raíces fueron gruesas, medias, finas y muy finas, abundantes en el Ap, finas y muy finas, comunes en el Bt1 y Bt2, finas, comunes en el horizonte Bt3, y ausentes en el horizonte BC. El horizonte BC presentó un 15 % de rocas meteorizadas.

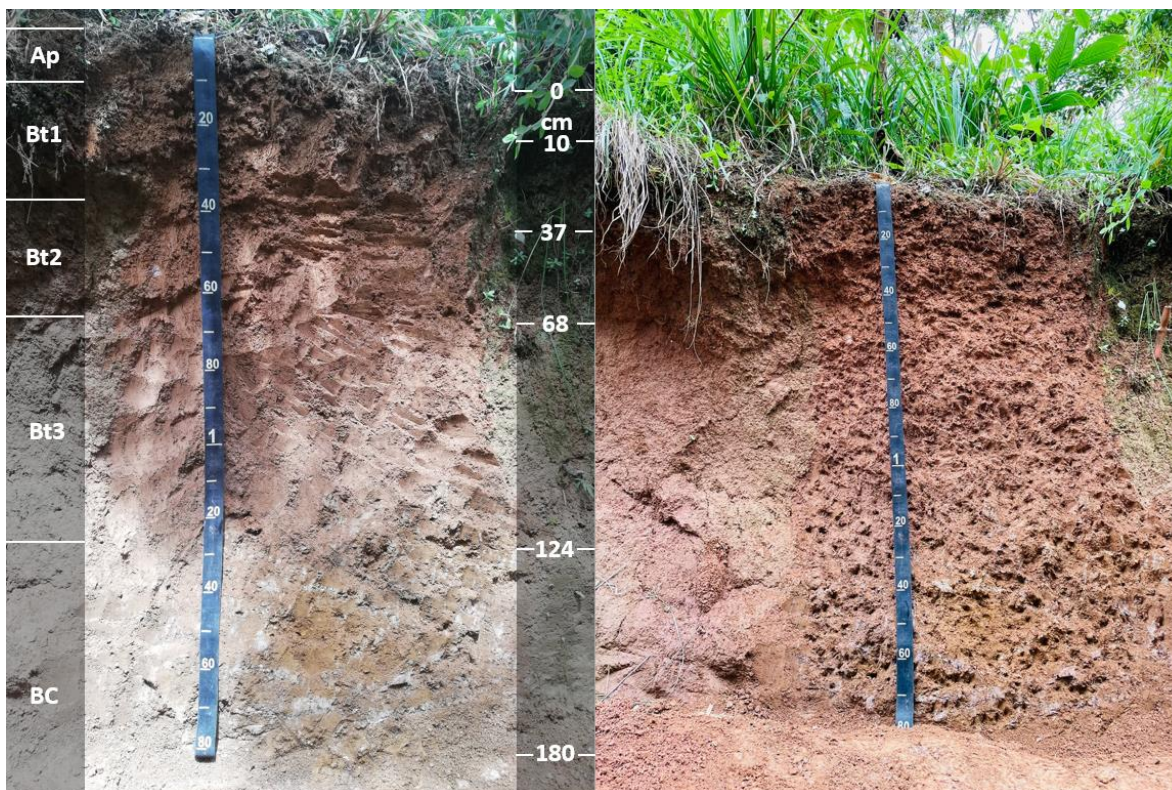


Figura 2.15. Perfil Puente (P13) clasificado como Typic Kandiuustox, ubicado en un área de relieve ligeramente ondulado y cubierta con pastos.

Sabana La Pelona (P14)

El perfil Sabana La Pelona se ubica en las coordenadas $9,204696^{\circ}$ latitud norte, $83,314272^{\circ}$ longitud oeste, a una altitud de 538 m s. n. m., en un área cubierta con pastos, con una pendiente de 11 % y relieve moderadamente ondulado. El material parental corresponde a cuerpos intrusivos del grupo granito-gabro Talamanca, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee drenaje lento y una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo rojizo oscuro (7.5 YR 3/4) a pardo rojizo (2.5 YR 5/3). El perfil se dividió en 5 horizontes, Ap de 0 a 9 cm de profundidad, Bt1 de 9 a 50 cm, Bt2 de 50 a 96 cm, Bt3 de 96 a 167 cm y BC de 167 a 195 cm. Los límites entre los horizontes Ap y Bt1, y Bt3 y BC fueron planos y claros, y planos graduales entre los horizontes Bt1 y Bt2, y Bt2 y Bt3. Sus texturas al tacto fueron arcillosas en los cinco horizontes. Los horizontes Ap y BC fueron ligeramente plásticos y ligeramente adhesivos, mientras que los horizontes Bt1, Bt2 y Bt3 fueron muy plásticos y muy adhesivos. El horizonte Ap presentó estructura de bloques subangulares, fina y de grado de desarrollo moderado; en los horizontes Bt1, Bt2 y Bt3 los

bloques subangulares fueron de tamaño medio de grado moderado; y finos débiles en el horizonte BC. De consistencia en húmedo friable en el horizonte Ap y firme en los horizontes Bt1, Bt2, Bt3 y BC. Los poros observados fueron gruesos, medios, finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap, finos y muy finos, comunes en el Bt1, Bt2 y Bt3, muy finos escasos en el horizonte BC; las raíces fueron gruesas, medias, finas y muy finas, abundantes en el Ap, finas y muy finas, comunes en el Bt1, finas y muy finas, escasas en los horizontes Bt2, Bt3 y ausentes en el horizonte BC. El horizonte Bt2 presentó rocas con películas de manganeso y el horizonte BC presentó un 25 % de rocas muy meteorizadas.



Figura 2.16. Perfil Sabana La Pelona (P14) clasificado como Rhodic Kandistox y paisaje asociado a su ubicación con relieve moderadamente ondulado y cobertura de pastos.

Dúrika (P15)

El perfil Dúrika se ubica en las coordenadas 9,251055° latitud norte, 83,260477° longitud oeste, a una altitud de 1075 m s. n. m., en un bosque secundario, con una pendiente de 16 % y relieve ondulado. El material parental corresponde a cuerpos intrusivos del grupo granito-gabro Talamanca, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee un buen drenaje y una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo oscuro (7.5 YR 2.5/2) a pardo fuerte (7.5 YR 5/6). El perfil se dividió en 5 horizontes, Ap de 0 a 18 cm

de profundidad, AB de 18 a 38 cm, Bt1 de 38 a 70 cm, Bt2 de 70 a 133 cm y CB de 133 a 200 cm. Los límites entre los horizontes Ap y AB, y Bt1 y Bt2 fueron planos y claros, y planos graduales entre los horizontes AB y Bt1, y Bt2, y Bt2 y CB. Sus texturas al tacto fueron arcillosas en los cinco horizontes. Los horizontes Ap y AB fueron moderadamente plásticos y moderadamente adhesivos, mientras que el horizonte Bt1 fue moderadamente plásticos y muy adhesivos, el horizonte Bt2 fue muy plástico y muy adhesivo, y el horizonte CB fue ligeramente plástico y ligeramente adhesivo. El horizonte Ap presentó estructura de bloques subangulares, fina de grado de desarrollo moderado, en los horizontes AB, Bt1 y Bt2 los bloques subangulares fueron de tamaño medio de grado moderado y medios de grado débil en el horizonte CB. De consistencia en húmedo friable en los horizontes Ap, AB, Bt1 y Bt2 y firme en el horizonte CB. Los poros observados fueron medios, finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap y AB, finos y muy finos, comunes en el Bt1, finos y muy finos, escasos en el Bt2 y CB; las raíces fueron medias, finas y muy finas, abundantes en el Ap y finas y muy finas, comunes en los horizontes AB, Bt1, Bt2 y CB. El horizonte Bt1 presentó cutanes gruesos y continuos, el horizonte Bt2 mostró principios de formación de plintita y el horizonte CB contaba con la presencia de pseudoarenas.

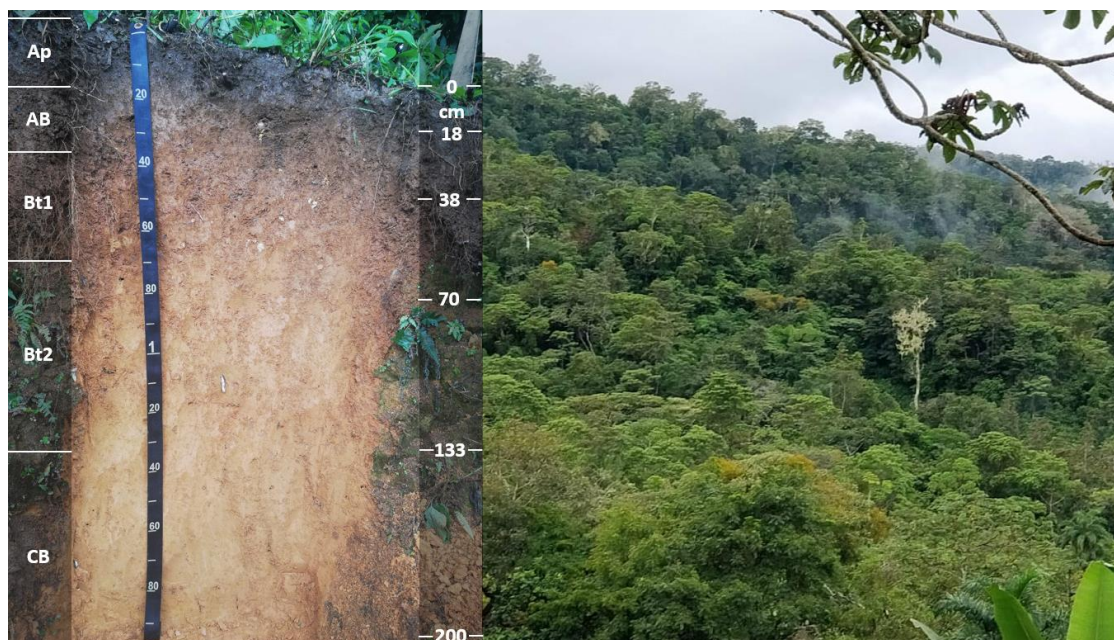


Figura 2.17. Perfil Dúrika (P15) clasificado como Typic Palehumults y paisaje asociado a su ubicación correspondiente a un bosque secundario.

Alto Guadalajara (P16)

El perfil Alto Guadalajara se ubica en las coordenadas 9,239056° latitud norte, 83,368536° longitud oeste, a una altitud de 925 m s. n. m., en un área cubierta con pasto, con una pendiente de 15 % y relieve moderadamente ondulado. El material parental corresponde al grupo granito-grabo Talamanca, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee drenaje moderadamente excesivo y una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo oscuro (7.5 YR 3/3) a rojo amarillento (5 YR 5/8). El perfil se dividió en 6 horizontes, Ap de 0 a 18 cm de profundidad, AC de 18 a 40 cm, 2Bt1 de 40 a 68 cm, 2Bt2 de 68 a 105 cm, 2BC de 105 a 122 cm y 2C de 122 a 220 cm. Los límites entre los horizontes Ap y A/C fue plano y claro, y planos graduales entre los horizontes A/C y 2Bt1, 2Bt1 y Bt2, Bt2 y 2BC, y 2BC y 2C. Las texturas en los 6 horizontes fueron arcillosas al tacto. Todos los horizontes fueron moderadamente plásticos y moderadamente adhesivos. Los horizontes Ap y A/C presentaron estructura de bloques subangulares, finos de grado de desarrollo moderado, en los horizontes 2Bt1, 2Bt2 los bloques subangulares fueron medios de grado moderado, finos de grado débil en el horizonte 2BC y el horizonte 2C presentó una estructura masiva. De consistencia en húmedo friable en los horizontes Ap y A/C, firme en los horizontes 2Bt1, 2Bt2 y 2BC y muy firme en el horizonte 2C. Los poros observados fueron medios, finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap, medios, comunes y finos y muy finos, abundantes en el AC, finos y muy finos, comunes en el 2Bt1, finos y muy finos, escasos en los horizontes 2Bt2 y 2BC, y ausentes en el horizonte 2C; las raíces fueron medias, finas y muy finas, abundantes en el Ap, finas y muy finas, comunes en los horizontes A/C y 2Bt1, finas y muy escasas, en el horizonte 2Bt2 y ausentes en el horizonte 2C. El horizonte Ap contó con la presencia abundante de lombrices, el horizonte A/C presentó un 50 % de roca meteorizada, los horizontes 2Bt1 y 2BC presentaron cutanes delgados discontinuos, mientras que el horizonte 2Bt2, además de presentar cutanes delgados discontinuos, también presentó nódulos de hierro y el horizonte 2C presentó un 60 % de roca muy alterada y presencia de nódulos de manganeso.

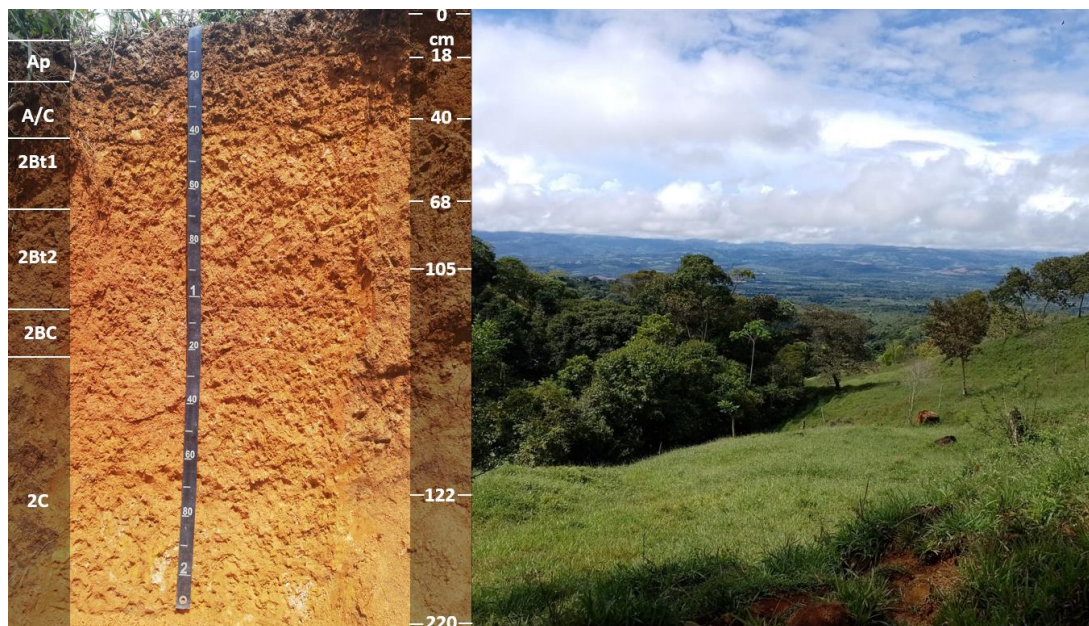


Figura 2.18. Perfil Alto Guadalajara (P16) clasificado como Typic Kandiuustox y paisaje asociado a su ubicación con una cobertura de pasturas para ganadería.

Río Cañas (P17)

El perfil río Cañas se ubica en la parte baja del abanico con el mismo nombre, en las coordenadas 9,200584° latitud norte, 83,400839° longitud oeste, a una altitud de 490 m s. n. m., en un área cubierta con pasto, una pendiente de 6 % y relieve ligeramente ondulado. El material parental corresponde al abanico aluvial del río Cañas, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee un buen drenaje y una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo rojo pardo (10 R 3/3) a rojo claro (10 R 6/8). El perfil se dividió en 4 horizontes, Ap de 0 a 10 cm de profundidad, Bt1 de 10 a 38 cm, Bt2 de 38 a 80 cm, BC de 80 a 140 cm. Los límites entre los horizontes Ap y Bt1, y Bt1 y Bt2 fueron planos y graduales, y planos claro entre los horizontes Bt2 y BC. La textura al tacto en el horizonte Ap fue franco arcillo-arenosa y arcillo-arenosa en los otros tres horizontes. El horizonte Ap fue ligeramente plástico y ligeramente adhesivo, mientras que los horizontes Bt1 y Bt2 fueron moderadamente plásticos y moderadamente adhesivos, y el horizonte BC fue ligeramente plástico y moderadamente adhesivo. Los horizontes Ap y Bt2 presentaron una estructura de bloques subangulares, fina de grado de desarrollo moderado, en el horizonte Bt1 y de tamaño medio y grado moderado y finos de grado débil en el horizonte BC. La consistencia en húmedo fue friable en los cuatro horizontes. Los poros observados fueron medios, finos y

muy finos, abundantes en los horizontes Ap y Bt1, finos y muy finos, abundantes en el Bt2 y BC; las raíces fueron medias, finas y muy finas, comunes en los horizontes Ap y Bt1, finas y muy finas, escasas en el Bt2, y ausentes en el horizonte BC.

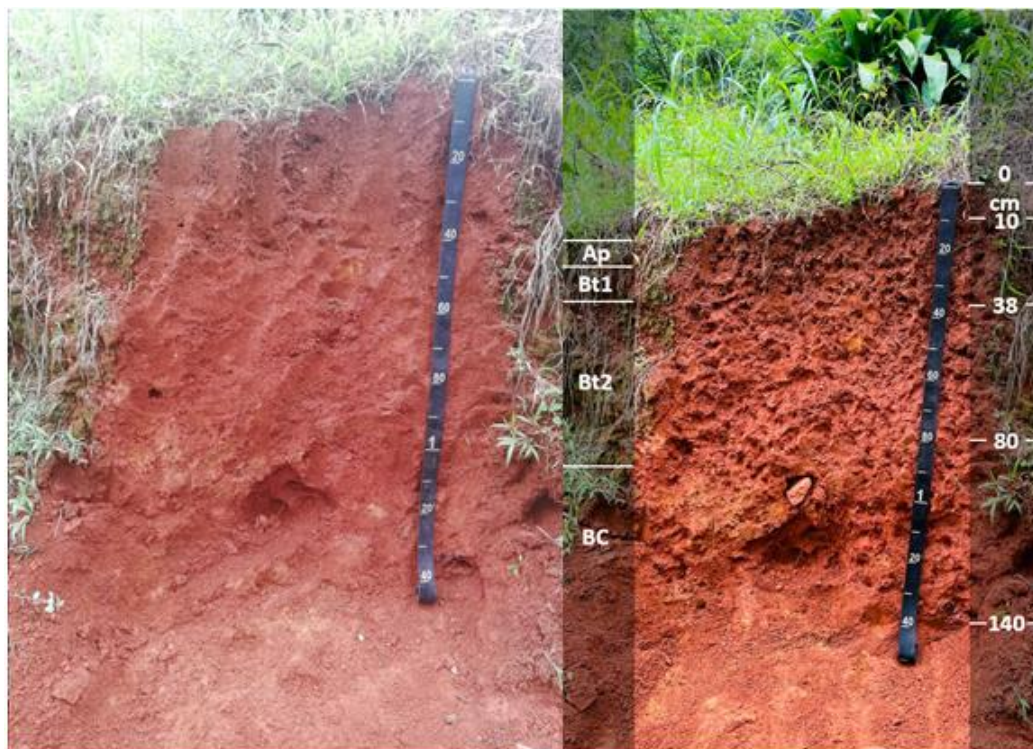


Figura 2.19. Perfil río Cañas (P17) clasificado como Rhodic Acrustox, ubicado en la parte baja del Abanico río Cañas en un área con relieve ligeramente ondulado.

Quebrada Palma (P18)

El perfil quebrada Palma es representativo del abanico que lleva el mismo nombre, se ubica en las coordenadas 9,179742° latitud norte, 83,378272° longitud oeste, a una altitud de 381 m s. n. m., en un área cultivada con piña, con una pendiente de 5 % y relieve ligeramente ondulado. El material parental corresponde al abanico aluvial quebrada Palma, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee un buen drenaje y una erosión muy severa. El color en húmedo de sus horizontes va de rojo (2.5 YR 4/6) a rojo amarillento (5 YR 4/6). El perfil se dividió en 4 horizontes, Ap de 0 a 30 cm de profundidad, Bt1 de 30 a 98 cm, Bt2 de 98 a 130 cm y C de 130 a 180 cm. Los límites entre los horizontes Ap y Bt1, y Bt2 y BC fueron planos y claros, y plano claro entre los horizontes Bt2 y C. Sus texturas al tacto fueron arcillosas en los tres primeros horizontes y areno-francoso en el horizonte C. Todos los horizontes fueron moderadamente plásticos y moderadamente adhesivos. El

horizonte Ap presentó estructura de bloques subangulares, finos de grado de desarrollo moderado, en los horizontes Bt1 y Bt2 los bloques subangulares fueron de tamaño medio y de grado moderado, y la estructura fue masiva en el horizonte C. De consistencia en húmedo friable en el primero horizonte y firme en los otros tres horizontes. Los poros observados fueron finos y muy finos, abundantes en los cuatro horizontes; las raíces fueron finas y muy finas, comunes en el Ap, muy finas, escasas en el Bt1 y ausentes en los horizontes Bt2 y C. Los horizontes Ap y Bt1 presentaron cutanes espesos continuos.



Figura 2.20. Perfil quebrada Palma (P18) clasificado como Typic Kandistox, ubicado en un área de relieve ligeramente ondulado dedicada al cultivo de piña.

Cacao (P19)

El perfil Cacao es representativo del abanico Cacao, se ubica en las coordenadas 9,23460° latitud norte, 83,48019° longitud oeste, a una altitud de 220 m s. n. m., en un área cultivada con caña de azúcar, con una pendiente de 3 % y relieve casi plano. El material parental corresponde al abanico aluvial Cacao, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee un buen drenaje y una erosión moderada. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo oscuro (7.5 YR 3/3) a rojo (2.5 YR 4/8). El perfil se dividió en 4 horizontes, Ap de 0 a 30 cm de profundidad, Bt de 30 a 92 cm, Bt/C de 92 a 135 cm y 2Bt/C de 135 a 200 cm. El límite entre los horizontes Ap y Bt fue plano y claro, y planos graduales entre los horizontes Bt y Bt/C, y Bt/C y 2Bt/C. La textura al tacto fue franco-arcillosa en el

horizonte Ap y arcillosas en los horizontes Bt, Bt/C y 2Bt/C. El horizonte Ap fue ligeramente plástico y ligeramente adhesivo, los horizontes Bt y Bt/C fueron moderadamente plásticos y moderadamente adhesivos y el horizonte 2Bt/C fue muy plástico y muy adhesivo. Los horizontes Ap, Bt/C y 2Bt/C presentaron estructura de bloques subangulares, fina de grado de desarrollo moderado y el horizonte Bt presentó estructura de bloques subangulares, media de grado moderado. De consistencia en húmedo friable en el horizonte Ap, firme en el horizonte Bt y muy firme en los horizontes Bt/C y 2Bt/C. Los poros observados fueron medios, comunes y finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap, gruesos, medios, finos y muy finos, escasos en los horizontes Bt y Bt/C y ausentes en el 2Bt/C; las raíces fueron medias, comunes y finas y muy finas, abundantes en el Ap, finas y muy finas, escasas en el Bt y ausentes en los horizontes Bt/C y 2Bt/C.



Figura 2.21. Perfil Cacao (P19) clasificado como Rhodic Kandustox, ubicado en un área dedicada al cultivo de caña de azúcar.

La Ceiba (20)

El perfil La Ceiba es representativo de un área de deslizamientos de la parte baja del abanico Cordoncillo, se ubica en las coordenadas 9,179086° latitud norte, 83,468417° longitud oeste, a una altitud de 478 m s. n. m., en un área cubierta con pastos encharralados, con una pendiente de 20 % y relieve ondulado. El material parental corresponde al abanico aluvial Cordoncillo, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee un buen

drenaje y una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo oscuro (7.5 YR 2.5/3) a rojo (2.5 YR 5/8). El perfil se dividió en 4 horizontes, Ap de 0 a 10 cm de profundidad, Bt1 de 10 a 30 cm, Bt2 de 30 a 80 cm y Bt3 de 80 a 130 cm. Los límites entre los horizontes fueron planos y claros. Las texturas al tacto fueron arcillosas en los cuatro horizontes. El horizonte Ap fue moderadamente plástico y moderadamente adhesivo, y los horizontes Bt1, Bt2 y Bt3 fueron muy plásticos y moderadamente adhesivos. El horizonte Ap presentó estructura de bloques subangulares, fina de grado de desarrollo moderado, y en los horizontes Bt1, Bt2 y Bt3 los bloques subangulares fueron de tamaño medio de grado moderado. De consistencia en húmedo firme en los cuatro horizontes. Los poros observados fueron medios, finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap, y finos y muy finos, comunes en los Bt1, Bt2 y Bt3; las raíces fueron medias, finas y muy finas, abundantes en los horizontes Ap y Bt1, medias, finas y muy finas, comunes, en el Bt2, y finas y muy finas, escasas en el horizonte Bt3. El horizonte Bt1 presentó cutanes delgados discontinuos y el horizonte Bt3 presentó un 10 % de rocas meteorizadas de entre 1 cm y 2 cm de diámetro.

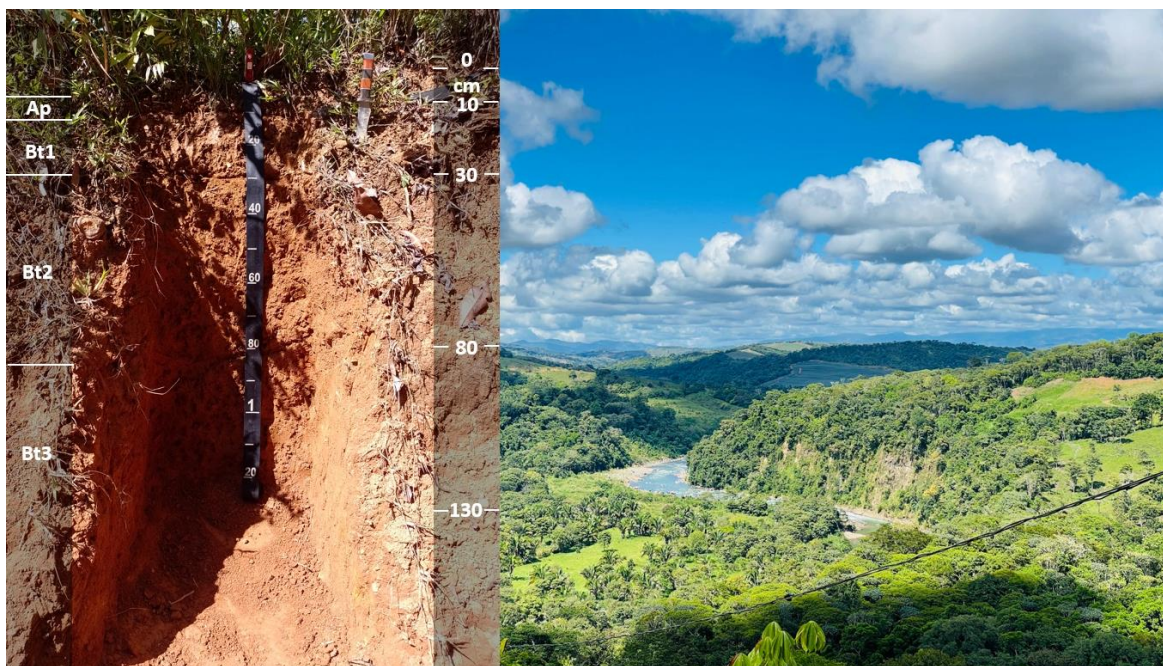


Figura 2.22. Perfil La Ceiba (P20) clasificado como Ustic Palehumults y paisaje asociado a su ubicación que corresponde al río General, límite natural entre los cantones Pérez Zeledón y Buenos Aires.

Las Juntas (P21)

El perfil Las Juntas es representativo del abanico quebrada Las Juntas, se ubica en las coordenadas 9,164600° latitud norte, 83,409759° longitud oeste, a una altitud de 407 m s. n., en un área cubierta con piña y caña de azúcar, con una pendiente de 5 % y relieve ligeramente ondulado. El material parental corresponde al abanico aluvial quebrada Las Juntas, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee buen drenaje y una erosión severa. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo fuerte (7.5 YR 5/6) a pardo rojizo oscuro (5 YR 3/3). El perfil se dividió en 3 horizontes, Ap de 0 a 10 cm de profundidad, Bt1 de 10 a 43 cm y Bt2 de 43 a 80 cm. El límite entre los horizontes Ap y Bt1 fue plano y difuso, y plano y claro entre los horizontes Bt1 y Bt2. Sus texturas fueron arcillosas en los tres horizontes, e igualmente fueron moderadamente plásticos y moderadamente adhesivos. El horizonte Ap presentó estructura de bloques subangulares, media de grado de desarrollo moderado, en los horizontes Bt1 y Bt2 los bloques subangulares fueron de tamaño medio de grado fuerte. De consistencia en húmedo friable en el primer y tercer horizonte y muy friable en el segundo horizonte. Los poros observados fueron finos y muy finos abundantes, en los horizontes Ap y Bt1, y muy finos, escasos en el Bt2; las raíces fueron medias, finas y muy finas, abundantes en el Ap, finas y muy finas, comunes en el Bt1, y ausentes en el horizonte Bt2. En el horizonte Ap se presentaron películas de manganeso y los horizontes Bt1 y Bt2 presentaron cutanes espesos y continuos.



Figura 2.23. Perfil Las Juntas (P21) clasificado como Ustic Palehumults, ubicado en un área de relieve ligeramente ondulado, dedicada al cultivo de piña.

Ujarrás (P22)

El perfil Ujarrás es representativo de las terrazas en la parte alta del río Ceibo, se ubica en las coordenadas 9,300528° latitud norte, 83,298568° longitud oeste, a una altitud de 910 m s. n. m., en un área cultivada con maíz, con una pendiente de 10 % y relieve moderadamente ondulado. El material parental corresponde a una terraza aluvial del río Ceibo, el nivel freático se encuentra a más de 2 m de profundidad, posee un buen drenaje, una erosión leve y un 15 % de roca superficial. El color en húmedo de sus horizontes va de pardo oscuro (7.5 YR 2.5/1) a negro (10 YR 2/1). El perfil se dividió en 4 horizontes, Ap de 0 a 40 cm de profundidad, A2 de 40 a 90 cm, CB de 90 a 172 cm y Ab de 172 a 200 cm. Los límites entre los horizontes Ap y A2, y CB y Ab fueron planos y claros, y ondulado y claro entre los horizontes A2 y CB. La textura al tacto fue franco-arenosa en los horizontes Ap y A2, arenofrancosa en el horizonte CB y arcillosa en el horizonte Ab. Los horizontes Ap, A2 y CB fueron ligeramente plásticos y ligeramente adhesivos, y el horizonte Ab fue ligeramente plástico y moderadamente adhesivo. Los horizontes Ap y A2 presentaron estructura de bloques subangulares, media de grado de desarrollo moderada, en el horizonte CB los bloques subangulares fueron de tamaño medio de grado débil, mientras que el horizonte Ab presentó una estructura laminar de tamaño medio y grado moderado. La consistencia en húmedo fue muy friable en los horizontes Ap y A2, friable en el horizonte CB y firme en el horizonte Ab. Los poros observados fueron medios, finos y muy finos, abundantes en el horizonte Ap, finos y muy finos, abundantes en el A2, medios, finos y muy finos, comunes en los horizontes CB y Ab; las raíces fueron medias, finas y muy finas, comunes en los horizontes Ap y A2, finas y muy finas, comunes en el CB, y finas y muy finas, escasas en el horizonte Ab.

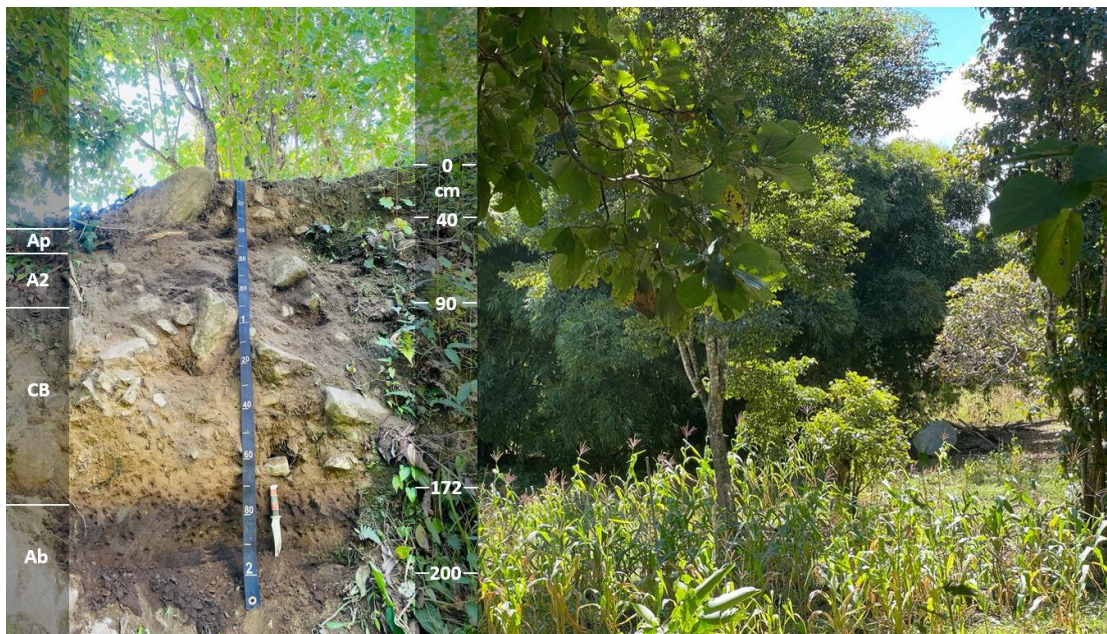


Figura 2.24. Perfil Ujarrás (P22) clasificado como Typic Ustorthents, ubicado en un terreno de relieve moderadamente ondulado con 15 % de pedregosidad superficial.

Cuadro 2.1. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P1, P2, P3 y P4.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color		Estructura Tipo/Tamaño/Grado	Adhesividad/Plasticidad (Consistencia en húmedo)	Límite	ρ_b (g cm ⁻³)	ρ_p	P (%)	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_{ad}	Arena	Limo	Arcilla	Txt	C. H. (cm/h)
		Húmedo	Seco														
San Juancito (P1)																	
Ap	0-25	2.5 YR 2,5/4	5 YR 4/3	sbk/ m, f, vf / 2	ss/ sp/ (FR)	SC	1,0	2,5	60	48	39	9	37	21	42	A	ND
AB	25-40	10 R 3/4	2.5 YR 5/6	sbk/ m, f, vf / 2	vs/ vp/ (FR)	WC	1,1	2,7	59	36	28	8	18	16	66	A	5,1
Bt1	40-78	10 R 3/6	2.5 YR 5/8	sbk/ m, f, vf / 3	vs/ vp/ (FR)	SC	1,2	2,0	40	42	32	10	22	18	60	A	1,1
Bt2	78-110	10 YR 4/8	5 YR 5/8	sbk/ m, f, vf / 2	vs/ vp/ (FR)	SC	1,1	2,7	59	34	23	11	37	17	46	A	5,6
Bt3	110-170	10 YR 4/8	5 YR 6/8	sbk/ co, m, f, vf / 3	vs/ vp/ (FR)	SC	1,3	4,0	68	36	27	9	34	20	46	A	273
B/C	170-225	10 YR 4/8	5 YR 5/8	sbk/ m, f, vf / 2	vs/ vp/ (FI)	-	1,2	2,2	45	37	27	10	25	18	57	A	160
Volcán (P2)																	
Ap	0-20	2.5 YR 3/4	7.5 YR 4/6	sbk/ m, f / 2	ss/ sp/ (FR)	SG	0,9	2,4	63	44	41	3	37	14	49	A	20
Bt1	20-50	2.5 YR 3/6	5 YR 5/6	sbk/ m, f / 2	s/ p/ (FI)	SG	1,2	2,6	54	34	31	3	23	7	70	A	ND
Bt2	50-70	2.5 YR 4/6	5 YR 6/8	sbk/ m, f / 2	s/ p/ (FI)	WC	1,1	2,7	59	41	38	3	21	8	71	A	ND
B/C	70-170	5 YR 3/6	5 YR 4/6	sbk/ m, f / 2	s/ p/ (FI)	-	1,2	2,7	56	37	33	4	22	8	70	A	ND
Peje (P3)																	
Ap	0-24	5 YR 4/4	10 YR 5/4	sbk/ m / 2	s/ p/ (FI)	SC	0,9	2,6	65	28	25	3	13	24	63	A	79
BA	24-36	5 YR 4/6	7.5 YR 4/6	sbk/ m / 2	s/ p/ (VFI)	SC	1,3	2,7	52	32	14	18	13	18	69	A	656
Bt1	36-89	5 YR 5/8	7.5 YR 5/6	sbk/ f / 2	vs/ vp/ (SR)	SC	1,2	2,7	56	32	23	9	6	19	75	A	1,0
Bt2	89-155	2.5 YR 4/8 7.5 YR 4/6	7.5 YR 5/8	sbk/ m, f / 2	vs/ vp/ (VFI)	SC	1,2	2,7	56	40	37	3	12	14	74	A	ND
Cv	155-230	(75%), 2.5 YR 3/6 (15%), 10 YR 3/3 (10%)	10YR 6/6	-	s/ p/ (VFI)	-	1,2	2,7	56	44	34	10	16	18	66	A	ND
Llano Bonito (P4)																	
Ap	0-15	5 YR 4/6	7.5 YR 4/6	gr/ vf / 2	s/ p/ (VFI)	SC	0,9	2,6	65	32	26	6	28	32	40	FA	5636
BA	15-39	5 YR 3/4	7.5 YR 5/6	sbk/ m, f, vf / 2	s/ p/ (FR)	SC	1,1	2,6	58	32	25	7	33	25	42	A	25
Bt	39-87	5 YR 5/6	7.5 YR 4/6	sbk/ f / 2	s/ p/ (VFI)	SG	1,1	2,6	58	31	25	7	16	14	70	A	15
Bt/C	87-164	10 R 4/8 7.5 YR 8/1	5 YR 5/8	sbk/ m / 2	s/ p/ (EF)	WG	1,4	2,7	48	28	19	9	22	28	50	A	9,0
Cr/Bt	164-300	(45%), 7.5 YR 1/6 (10%), 10 R 3/6 (5%)	5 YR 6/8	-	-	-	1,4	2,7	48	28	23	5	24	26	50	A	1,0

* Códigos de descripción según Schoeneberger *et al.* (2012). Estructura: Tipo (sbk: bloques subangulares, gr: granular), tamaño (co: gruesa, m: media, f: fina, vf: muy fina), grado (2: moderada, 3: fuerte). Adherencia (ss: ligeramente adhesivo, s: moderadamente adhesivo, vs: muy adhesivo), plasticidad (sp: ligeramente plástico, p: moderadamente plástico, vp: muy plástico); Consistencia en húmedo (FR: friable, FI: firme, VFI: muy firme, SR: ligeramente rígido). Límites: Topografía (S: plano, W: ondulado), nitidez (C: claro, G: gradual). ρ_b : densidad aparente; ρ_p : densidad de partículas; P: porosidad total; θ_{cc} : humedad a capacidad de campo; θ_{pmp} : humedad en el punto de marchitez permanente; θ_{ad} : agua disponible; Txt: clase textural (A: Arcillosa, FA: Franco Arcillosa). C. H: Conductividad hidráulica. ND: No detectable.

Cuadro 2.2. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P5, P6, P7 y P8.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color		Estructura Tipo/Tamaño/Grado	Adhesividad/Plasticidad (Consistencia en húmedo)	Límite	ρ_b	ρ_p	P	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_{ad}	Arena			Limo	Arcilla	Txt	C. H. (cm/h)
		Húmedo	Seco										(%)						
El Ángel Arriba (P5)																			
Ap	0-15	5 YR 3/2	10 YR 5/4	sbk/ m, f, vf / 1	ss/ sp/ (FR)	SC	0,7	2,3	70	48	42	5	85	8	7	7	aF	ND	
A2	15-35	7.5 YR 2.5/2	10 YR 4/2	sbk/ m, f, vf / 1	ss/ sp/ (FR)	SC	0,4	2,0	80	39	36	3	78	8	14	14	Fa	ND	
C/A	35-50	7.5 YR 2.5/2	10 YR 5/3	sbk/ m, f, vf / 1	ss/ sp/ (FR)	-	-	-	-	-	-	-	35	22	43	43	A	-	
El Ángel (P6)																			
Ap	0-15	7.5 YR 4/4	7.5 YR 5/6	sbk/ m, f, vf / 1	ss/ sp/ (FR)	SC	0,6	2,2	73	43	31	12	47	11	42	42	Aa	ND	
Bt1	15-40	7.5 YR 5/8	7.5 YR 6/8	sbk/ m, f, vf / 1	ss/ sp/ (FR)	SC	0,5	2,3	78	36	32	4	32	11	57	57	A	ND	
Bt2	40-70	5 YR 5/8	7.5 YR 5/8	sbk/ m, f, vf / 1	ss/ sp/ (FR)	SC	0,7	1,8	61	34	26	8	12	28	60	60	A	ND	
BC	70-160	2.5 YR 5/8 (95%), 10 R 4/8 (5%)	7.5 YR 5/8	sbk/ m, f, vf / 1	ss/ sp/ (FR)	SC	0,4	2,1	81	35	26	9	22	18	60	60	A	ND	
C	160-200	5 YR 5/6 (65%), 10 YR 6/6 (20%), 10 R 4/8 (15%)	7.5 YR 6/6	-	ss/ sp/ (FR)	-	0,3	2,1	86	38	29	59	20	20	60	60	A	ND	
Guadalajara (P7)																			
Ap	0-10	7.5 YR 4/6	7.5 YR 5/6	sbk/ f / 2	s/ sp/ (VFI)	SC	1,2	2,6	54	30	24	6	30	18	52	52	A	23	
Bt/A	10-42	7.5 YR 5/6	7.5 YR 4/6	sbk/ f / 2	s/ sp/ (EF)	SC	1,2	2,4	50	27	22	5	23	19	58	58	A	534	
Bt1	42-74	2.5 YR 4/6	5 YR 5/8	sbk/ m / 2	s/ sp/ (SR)	SC	1,4	2,1	33	37	20	17	22	19	59	59	A	1,0	
Bt2	74-112	10 R 4/8	7.5 YR 5/6	sbk/ m / 2	s/ sp/ (EF)	SC	1,5	2,8	46	32	27	5	32	19	49	49	A	ND	
Bt3	112-190	10 R 4/8	7.5 YR 5/6	sbk/ m / 2	s/ sp/ (EF)	-	1,5	2,7	44	30	23	7	38	19	43	43	A	ND	
Santa María (P8)																			
A	0-35	10 YR 3/2	10 YR 3/2	gr/ f / 2	ss/ sp/ (FR)	BC	1,1	2,5	56	30	19	11	52	26	22	22	FAa	15	
C1/A	35-100	10 YR 2/2	10 YR 2/2	gr/ f / 2	ss/ sp/ (FR)	BG	-	-	-	-	-	-	46	26	28	28	FA	-	
C2/A	100-150	10 YR 3/2	10 YR 3/2	gr/ f / 2	ss/ sp/ (FR)	BG	-	-	-	-	-	-	42	18	30	30	FA	-	
C3/A	150-200	10 YR 3/3	10 YR 3/3	gr/ f / 2	ss/ sp/ (FR)	BG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cr	200-300	10 YR 5/3	10 YR 3/3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Códigos de descripción según Schoeneberger *et al.* (2012). Estructura: Tipo (sbk: bloques subangulares, gr: granular), tamaño (m: media, f: fina, vf: muy fina), grado (1: débil, 2: moderada). Adherencia (ss: ligeramente adhesivo, s: moderadamente adhesivo), plasticidad (sp: ligeramente plástico); Consistencia en húmedo (FR: friable, SR: ligeramente rígido, VFI: muy firme, EF: extremadamente firme). Límites: Topografía (S: plano, B: quebrado), nitidez (C: claro, G: gradual). ρ_b : densidad aparente; ρ_p : densidad de partículas; P: porosidad total; θ_{cc} : humedad a capacidad de campo; θ_{pmp} : humedad en el punto de marchitez permanente; θ_{ad} : agua disponible; Txt: clase textural (A: Arcillosa, Aa: Arcillo arenosa, FA: Franco Arcillosa, FAa: Franco Arcillo arenosa, Fa: Franco arenosa, aF: arena franca). C. H.: Conductividad hidráulica. ND: No detectable.

Cuadro 2.3. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P9, P10, P11 y P12.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color		Estructura Tipo/Tamaño/Grado	Adhesividad/Plasticidad (Consistencia en húmedo)	Límite	ρ_b	ρ_p	P	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_{ad}	Arena (%)	Limo	Arcilla	Txt	C. H. (cm/h)
		Húmedo	Seco														
Convento (P9)																	
Ap	0-20	5 YR 3/4	7.5 YR 4/6	sbk/ f / 2	s/ vp/ (FR)	SC	1,1	2,7	59	88	36	52	21	13	66	A	ND
Bt1	20-47	5 YR 4/6	7.5 YR 5/8	sbk/ m / 2	vs/ vp/ (FI)	SC	1,2	3,0	56	49	30	19	18	16	66	A	ND
Bt2	47-140	2.5 YR 4/6	7.5 YR 5/6	sbk/ m / 2	vs/ vp/ (FI)	SC	1,3	1,9	32	36	33	3	16	20	64	A	ND
B/C	140-200	2.5 YR 4/8 (75%), 10 R 3/4 (25%)	5 YR 6/6	sbk/ co / 1	ss/ p/ (SR)	-	1,4	3,0	48	33	30	3	31	33	36	FA	ND
Buenos Aires (P10)																	
Ap	0-10	10 YR 3/4	10 YR 5/3	sbk/ f / 2	s/ p/ (FR)	SC	1,1	2,5	56	39	15	24	24	15	61	A	ND
AB	10-24	10 YR 3/6 (85%), 10 YR 3/4 (15%)	10 YR 5/6	sbk/ f / 2	s/ p/ (FR)	SC	1,3	2,6	50	31	22	6	12	18	70	A	ND
Bt1	24-70	2.5 YR 3/6	7.5 YR 5/8	sbk/ m / 2	s/ vp/ (FI)	SC	1,2	2,6	54	30	29	1	21	3	76	A	ND
Bt2	70-120	2.5 YR 3/6	2.5 YR 4/8	pr/ m / 2	s/ vp/ (FI)	SG	1,2	2,7	56	40	38	2	22	3	75	A	ND
Bt3	120-150	2.5 YR 3/6 (95%), 10 YR 5/6 (5%)	2.5 YR 4/8	sbk/ co / 1	s/ vp/ (FI)	SC	1,2	2,6	54	39	36	3	7	15	78	A	ND
Bt4	150-180	2.5 YR 3/6 (90%), 2.5 YR 3/6 (10%)	2.5 YR 4/8	sbk/ co / 1	s/ p/ (VFI)	SG	1,2	2,6	54	40	38	2	6	13	81	A	ND
BC	180-220	10 R 4/4	2.5 YR 4/6	sbk/ co / 1	s/ p/ (VFI)	SG	1,3	2,7	52	38	35	3	7	18	75	A	ND
BCr	220-240	-	2.5 YR 4/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordocillo (P11)																	
Ap	0-35	5 YR 2/4	7.5 YR 4/4	sbk/ m, f / 2	s/ p/ (FR)	SG	0,9	2,4	63	54	50	4	35	18	47	A	408
Bt1	35-60	2.5 YR 3/6	7.5 YR 5/6	sbk/ m / 2	s/ p/ (FR)	SC	1,0	3,0	60	92	79	13	17	26	57	A	ND
Bt2	60-110	10 R 4/8	5 YR 5/8	sbk/ m / 2	s/ vp/ (FR)	SG	1,2	3,0	56	44	32	12	12	18	70	A	2,0
Bt3	110-142	10 R 5/6	5 YR 5/6	sbk/ m / 2	vs/ vp/ (FI)	SC	1,1	2,7	59	43	37	6	20	23	57	A	ND
BC	142-200	2.5 YR 4/8	5 YR 6/6	sbk/ co / 1	vs/ vp/ (VFI)	-	1,1	2,7	59	45	36	9	25	20	55	A	ND
Río Azul (P12)																	
Ap	0-17	5 YR 3/4	5 YR 3/4	sbk/ f / 2	s/ p/ (FR)	SC	0,7	1,3	46	59	56	3	22	8	70	A	900
Bt1	17-82	5 YR 4/6	5 YR 5/6	sbk/ m / 2	s/ p/ (FI)	WC	1,1	2,0	45	54	42	12	12	11	77	A	ND
Bt2	82-130	2.5 YR 3/6	2.5 YR 4/6	sbk/ m / 2	vs/ vp/ (FI)	WG	1,0	3,1	68	53	45	8	12	16	72	A	ND
Bt3	130-180	2.5 YR 3/6	2.5 YR 4/8	sbk/ m / 2	vs/ vp/ (FI)	SC	1,0	2,7	63	47	42	5	22	21	57	A	ND
BC	180-200	2.5 YR 3/6 (50%), 2.5 YR 5/1 (25%), 2.5 YR 6/6 (25%)	2.5 YR 5/4	sbk/ f / 1	s/ p (FI)	-	1,3	2,8	54	39	30	9	25	20	55	A	ND

Códigos de descripción según Schoeneberger *et al.* (2012). Estructura: Tipo (sbk: bloques subangulares), tamaño (co: gruesa, m: media, f: fina), grado (1: débil, 2: moderada). Adherencia (s: moderadamente adhesivo, vs: muy adhesivo), plasticidad (p: moderadamente plástico, vp: muy plástico); Consistencia en húmedo (FR: friable, FI: firme, VFI: muy firme,). Límites: Topografía (S: plano, W: ondulado), nitidez (C: claro, G: gradual). ρ_b : densidad aparente; ρ_p : densidad de partículas; P: porosidad total; θ_{cc} : humedad a capacidad de campo; θ_{pmp} : humedad en el punto de marchitez permanente; θ_{ad} : agua disponible; Txt: clase textural (A: Arcillosa, FA: Franco Arcillosa). C. H.: Conductividad hidráulica. ND: No detectable.

Cuadro 2.4. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P13, P14, P15 y P16.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color		Estructura Tipo/Tamaño/Grado	Adhesividad/Plasticidad (Consistencia en húmedo)	Límite	ρ_b	ρ_p	P	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_{ad}	Arena			Limo	Arcilla	Txt	C. H. (cm/h)
		Húmedo	Seco										(%)						
Puente (P13)																			
Ap	0-10	7.5 YR 3/4	7.5 YR 4/4	sbk/ f / 2	ss/ sp/ (FR)	SG	1,1	2,6	58	46	40	6	42	8	50	A	7,0		
Bt1	10-37	5 YR 4/4	5 YR 5/4	sbk/ f / 2	ss/ sp/ (FI)	SG	1,1	2,7	59	54	44	10	10	12	78	A	ND		
Bt2	37-68	5 YR 4/6	5 YR 5/6	sbk/ f / 2	ss/ sp/ (FI)	SG	1,2	2,7	56	37	31	6	11	14	75	A	ND		
Bt3	68-124	7.5 YR 4/6	7.5 YR 5/4	sbk/ f / 1	ss/ sp/ (FI)	WG	1,2	2,0	56	50	33	17	10	20	70	A	ND		
BC	124-180	7.5 YR 4/8 (75%), 7.5 YR 6/2 (25%)	5 YR 6/4	sbk/ f / 1	ss/ sp/ (FR)	-	1,2	3,0	61	51	32	19	30	20	50	A	ND		
Sabana La Pelona (P14)																			
Ap	0-9	7.5 YR 3/4	7.5 YR 5/2	sbk/ f / 2	ss/ sp/ (FR)	SC	0,7	3,0	77	80	71	9	15	15	70	A	ND		
Bt1	9-50	10 R 3/6	10 R 5/8	sbk/ m / 2	vs/ vp/ (FI)	SG	1,2	3,0	56	41	37	4	14	15	71	A	ND		
Bt2	50-96	10 R 3/8 (95%), 5 YR 5/6 (5%)	2.5 YR 5/6	sbk/ m / 2	vs/ vp/ (FI)	SG	1,2	3,0	56	45	39	6	12	16	72	A	ND		
Bt3	96-167	10 R 5/8 (50%), 5 YR 5/4 (25%), 7.5 YR 6/8 (25%)	5 YR 6/6	sbk/ m / 2	vs/ vp/ (FI)	SC	1,0	2,7	63	47	37	10	10	18	72	A	ND		
BC	167-195	2.5 YR 5/3 (50%), 7.5 YR 6/8 (30%), 10 R 4/6 (10%), 10 R 2.5/1 (10%)	2.5 YR 6/6	sbk/ f / 1	ss/ sp/ (FI)	-	1,1	2,7	59	83	76	7	10	13	37	Aa	ND		
Dúrika (P15)																			
Ap	0-18	7.5 YR 2.5/1	7.5 YR 5/2	sbk/ m / 2	s/ p/ (FR)	SC	0,7	2,4	71	53	50	3	35	20	45	A	ND		
AB	18-38	7.5 YR 3/3 (60%), 7.5 YR 3/2 (40%)	7.5 YR 5/4	sbk/ m / 2	s/ p/ (FI)	SG	1,1	2,6	58	36	29	8	42	8	50	A	ND		
Bt1	38-70	5 YR 4/6 (60%), 2.5 YR 3/6 (40%)	5 YR 5/6	sbk/ m / 2	vs/ p/ (FI)	SC	1,1	2,6	58	35	32	3	20	18	62	A	ND		
Bt2	70-133	7.5 YR 5/6 (70%), 2.5 YR 4/8 (30%)	7.5 YR 7/6	sbk/ m / 2	vs/ vp/ (FI)	SG	1,3	2,7	52	32	30	2	42	42	50	A	ND		
CB	133-200	2.5 YR 5/2 (40%), 7.5 YR 7/6 (30%), 10 Y 4/8 (30%)	7.5 YR 8/4	sbk/ m / 1	s/ p/ (FI)	-	1,3	2,6	50	36	31	5	50	10	40	Aa	ND		
Alto Guadalajara (P16)																			
Ap	0-18	7.5 YR 3/3 (70%), 7.5 YR 4/6 (25%), 7.5 YR 6/8 (5%)	7.5 YR 5/4	sbk/ f / 2	s/ p/ (FR)	SC	0,9	2,4	63	50	37	13	65	5	30	FAa	ND		
A/C	18-40	7.5 YR 4/6 (60%), 7.5 YR 6/8 (40%)	7.5 YR 5/8	sbk/ f / 2	s/ p/ (FR)	SG	1,1	2,6	58	28	19	9	15	9	75	A	ND		
2Bt1	40-68	7.5 YR 6/8	7.5 YR 7/6	sbk/ m / 2	s/ p/ (FI)	SG	1,2	2,7	56	31	28	3	22	6	72	A	ND		
2Bt2	68-105	5 YR 5/6 (60%), 7.5 YR 5/6 (25%), 2.5 YR 5/6 (15%)	7.5 YR 7/8	sbk/ m / 2	s/ p/ (FI)	SG	1,1	2,7	59	44	40	4	17	8	75	A	ND		
2BC	105-122	5 YR 5/8 (90%), 7.5 YR 5/8 (5%), 7.5 YR 6/8 (5%)	7.5 YR 5/8	sbk/ f / 1	s/ p/ (FI)	SG	1,1	2,7	59	47	41	6	16	14	70	A	ND		
2C	122-220	5 YR 5/8 (50%), 7.5 YR 5/8 (25%), 7.5 YR 6/8 (25%)	7.5 YR 7/6	0	s/p/ (VFI)	-	1,0	2,6	62	52	40	12	35	15	50	A	ND		

Códigos de descripción según Schoeneberger *et al.* (2012). Estructura: Tipo (sbk: bloques subangulares), tamaño (m: media, f: fina), grado (0: sin estructura, 1: débil, 2: moderada). Adherencia (ss: ligeramente adhesivo, s: moderadamente adhesivo, vs: muy adhesivo), plasticidad (sp: ligeramente plástico, p: moderadamente plástico, vp: muy plástico); Consistencia en húmedo (FR: friable, FI: firme, VFI: muy firme). Límites: Topografía (S: plano, W: ondulado), nitidez (C: claro, G: gradual). ρ_b : densidad aparente; ρ_p : densidad de partículas; P: porosidad total; θ_{cc} : humedad a capacidad de campo; θ_{pmp} : humedad en el punto de marchitez permanente; θ_{ad} : agua disponible; Txt: clase textural (A: Arcillosa, Aa: Arcillo arenosa, FA: Franco Arcillosa, FAa). C. H.: Conductividad hidráulica. ND: No detectable.

Cuadro 2.5. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P17, P18, P19 y P20.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color		Estructura Tipo/Tamaño/Grado	Adhesividad/Plasticidad (Consistencia en húmedo)	Límite	ρ_b	ρ_p	P	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_{ad}	Arena	Limo	Arcilla	Txt	C. H. (cm/h)
		Húmedo	Seco														
Río Cañas (P17)																	
Ap	0-10	10 R 3/3	2.5 YR 4/8	sbk/ f / 2	ss/ sp/ (FR)	SD	1,1	2,0	45	31	20	11	75	5	20	Fa	ND
Bt1	10-38	10 R 3/4	2.5 YR 5/8	sbk/ m / 2	s/ p/ (FR)	SG	1,2	2,6	54	34	20	14	25	15	60	A	4,8
Bt2	38-80	10 R 6/6	2.5 YR 4/8	sbk/ f / 2	s/ p/ (FR)	SC	1,3	2,0	35	28	19	9	22	23	55	A	ND
BC	80-140	10 R 6/8	2.5 YR 5/8	sbk/ f / 1	s/ sp/ (FI)	-	1,2	2,7	56	38	32	6	52	8	40	Aa	ND
Quebrada Palma (P18)																	
Ap	0-30	2.5 YR 4/6	2.5 YR 5/8	sbk/ f / 2	s/ p/ (FR)	SC	1,2	2,6	54	35	27	8	22	18	60	A	ND
Bt1	30-98	10 R 5/8	5 YR 5/8	sbk/ m / 2	s/ p/ (FI)	SC	1,1	2,6	50	43	29	14	10	14	76	A	ND
Bt2	98-130	(85%), 7.5 YR 5/6 (15%)	5 YR 6/8	sbk/ m / 2	s/ p/ (FI)	WC	1,3	2,6	58	36	20	16	10	15	75	A	60,4
C	130-180	(60%), 7.5 YR 6/8 (35%), 5 YR 8/2 (5%)	2.5 YR 5/8	0	s/ p/ (FI)	-	1,1	2,7	59	43	17	26	52	16	32	FAa	ND
Cacao (P19)																	
Ap	0-30	7.5 YR 3/3	7.5 YR 5/2	sbk/ f / 2	ss/ sp/ (FR)	SC	1,2	2,5	52	37	32	5	27	3	70	A	3,6
Bt	30-92	2.5 YR 3/8	7.5 YR 5/8	sbk/ m / 2	s/ p/ (FI)	SG	1,1	2,5	56	47	40	7	25	5	70	A	ND
Bt/C	92-135	7.5 YR 5/8	7.5 YR 7/6	sbk/ f / 2	s/ p/ (VFI)	SG	1,3	2,7	52	32	28	4	35	8	57	A	ND
2Bt/C	135-200	(90%), 2.5 YR 3/3 (10%)	7.5 YR 7/8	sbk/ f / 2	vs/ vp/ (VFI)	-	1,5	2,6	42	42	36	6	30	15	55	A	ND
La Ceiba (P20)																	
Ap	0-10	7.5 YR 2.5/3	7.5 YR 4/6	sbk/ f / 2	s/ p/ (FI)	SC	0,9	2,4	63	44	40	4	28	23	49	A	526
Bt1	10-30	7.5 YR 4/6	7.5 YR 5/6	sbk/ m / 2	s/ vp/ (FI)	SC	1,0	2,6	62	38	33	5	20	23	57	A	29,4
Bt2	30-80	2.5 YR 4/8	5 YR 6/8	sbk/ m / 2	s/ vp/ (FI)	SC	1,2	2,6	54	38	36	2	12	23	65	A	ND
Bt3	80-130	2.5 YR 5/8	5 YR 6/6	sbk/ m / 2	s/ vp/ (FI)	-	1,2	2,7	56	43	38	5	17	23	60	A	ND

Códigos de descripción según Schoeneberger *et al.* (2012). Estructura: Tipo (sbk: bloques subangulares), tamaño (m: media, f: fina), grado (0: sin estructura, 1: débil, 2: moderada). Adherencia (ss: ligeramente adhesivo, s: moderadamente adhesivo), plasticidad (sp: ligeramente plástico, p: moderadamente plástico, vp: muy plástico); Consistencia en húmedo (FR: friable, FI: firme). Límites: Topografía (S: plano, W: ondulado), nitidez (C: claro, G: gradual, D: difuso). ρ_b : densidad aparente; ρ_p : densidad de partículas; P: porosidad total; θ_{cc} : humedad a capacidad de campo; θ_{pmp} : humedad en el punto de marchitez permanente; θ_{ad} : agua disponible; Txt: clase textural (A: Arcillosa, Aa: Arcillo arenosa, FAa: Franco Arcillo arenosa, Fa: Franco arenosa). C. H: Conductividad hidráulica. ND: No detectable.

Cuadro 2.6. Características morfológicas y variables físicas para los perfiles P21 y P22.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color		Estructura Tipo/Tamaño/Grado	Adhesividad/Plasticidad (Consistencia en húmedo)	Límite	ρ_b	ρ_p	P	θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_{ad}	Arena	Limo	Arcilla	Txt	C. H. (cm/h)
		Húmedo	Seco														
Las Juntas (P21)																	
Ap	0-10	7.5 YR 5/6	5 YR 4/6	sbk/ m / 2	s/ p/ (FR)	SD	0,7	2,5	72	59	38	21	15	8	77	A	ND
Bt1	10-43	5 YR 3/4	5 YR 5/8	sbk/ m / 3	s/ p/ (VFR)	SC	0,9	2,5	64	96	90	6	12	11	77	A	39,0
Bt2	43-80	5 YR 3/3	5 YR 4/6	sbk/ m / 3	s/ p/ (FR)	-	0,8	2,5	68	34	29	5	10	10	80	A	6,6
Ujarrás (P22)																	
Ap	0-40	7.5 YR 2.5/1	7.5 YR 5/6	sbk/ m / 2	ss/ sp/ (VFR)	SC	0,9	1,9	53	95	40	55	55	28	17	Fa	5,1
A2	40-90	10 YR 2/1	7.5 YR 2.5/1	sbk/ m / 2	ss/ sp/ (VFR)	SW	0,9	2,4	63	28	14	14	50	28	22	F	4,5
CB	90-172	10 YR 4/4	10 YR 6/4	sbk/ m / 1	ss/ sp/ (FR)	SC	1,3	2,7	52	22	9	13	62	23	15	Fa	ND
Ab	172-200	10 YR 2/2	10 YR 3/2	pr/ m / 2	s/ sp/ (FI)	-	0,9	2,6	65	27	19	8	50	25	25	FAa	16,6

Códigos de descripción según Schoeneberger *et al.* (2012). Estructura: Tipo (sbk: bloques subangulares, pr: prismática), tamaño (m: media), grado (1: débil, 2: moderada, 3: fuerte). Adherencia (ss: ligeramente adhesivo, s: moderadamente adhesivo), plasticidad (sp: ligeramente plástico, p: moderadamente plástico); Consistencia en húmedo (VFR: muy friable, FR: friable, FI: firme). Límites: Topografía (S: plano), nitidez (C: claro, G: gradual, D: difuso). ρ_b : densidad aparente; ρ_p : densidad de partículas; P: porosidad total; θ_{cc} : humedad a capacidad de campo; θ_{pmp} : humedad en el punto de marchitez permanente; θ_{ad} : agua disponible; Txt: clase textural (A: Arcillosa, FAa: Franco Arcillo arenosa, Fa: Franco arenosa, F: Franca). C. H: Conductividad hidráulica. ND: No detectable.

Características físicas de los perfiles en estudio

Los perfiles Volcán (P2), Peje (P3), Covento (P9), Buenos Aires (P10), Cordoncillo (P11), río Azul (P12), Puente (P13), Sabana La Pelona (P14), Alto Guadalajara (P16), quebrada Palma (P18), Cacao (P19) y Las Juntas (P21), fueron los que mostraron los mayores porcentajes de arcilla en sus horizontes, con valores desde 60 % hasta 75 %, por lo que se pueden considerar suelos desarrollados desde el punto de vista pedológico. El perfil San Juancito (P1) mostró altos contenidos de arcilla, lo que indica que es un suelo maduro; sus clases texturales fue arcilloso desde el primer horizonte, el cual tenía un 42 % de arcilla, los siguientes horizontes también fueron arcillosos, de los cuales el AB fue el que presentó el mayor porcentaje de arcilla (66 %) de todo el perfil. El perfil Llano Bonito (P4) presentó en el primer horizonte fue una clase textural franco arcillosa y el resto de horizontes fueron designados arcillosos. El perfil El Ángel (P6), presentó en su horizonte Ap un contenido de arena de 47 % y un 42 % de arcilla, por lo que es arcillo arenoso; el resto de horizontes fueron arcillosos, los contenidos de arcilla estuvieron entre 55 % y 60 %. El perfil Guadalajara (P7) fue arcilloso en todos sus horizontes y presentó contenidos de arcilla de 52 % en el horizonte Ap, 58 % en el AB, y en los horizontes Bt1, Bt2 y Bt3 contenidos de 59 %, 49 % y 43 % de arcilla. Comportamiento similar en el contenido de arcilla lo presentaron los perfiles, Dúrika (P15), río Cañas (P17) y La Ceiba (P20), cuyos porcentajes de arcilla, aunque fueron menores a 60 %, de igual modo se designaron como arcillosos. Los perfiles El Ángel Arriba, Santa María (P8) y Ujarrás (P22), presentaron mayores porcentajes de arena que de arcilla, lo que indica que son suelos relativamente jóvenes en comparación con los demás perfiles estudiados; el perfil El Ángel Arriba (P5) presentó 7 % arcilla y 85 % de arena en el horizonte Ap, para una clase textural de arena franca; el horizonte A2 tuvo un 14 % de arcilla y un 78 % de arena, para una clase textural franco arenosa y en el horizonte C/A presentó un 43 %, el que tuvo el mayor porcentaje, por lo que se designó como arcilloso. El horizonte A de Santa María presentó 22 % de arcilla y un 52 % de arena, el horizonte C1/A tuvo un contenido de arena de 46 % y 28 % de arcilla, para ambos la clase textural es franco arcillo arenosa, y el horizonte C2/A tuvo un 42 % de arena y 30 % de arcilla siendo franco arcilloso. El perfil de Ujarrás presentó porcentajes de arena mayores a 50 %, mientras los contenidos de arcilla, no superaron el 25 %, por lo que los horizontes presentaron clases texturales francas, y se destaca el horizonte Ab (enterrado), en el mayor porcentaje de arcilla en este perfil (25 %).

El comportamiento del contenido de arcilla a través de la profundidad de los perfiles estudiados se muestra de la figura 2.25 a la figura 2.27.

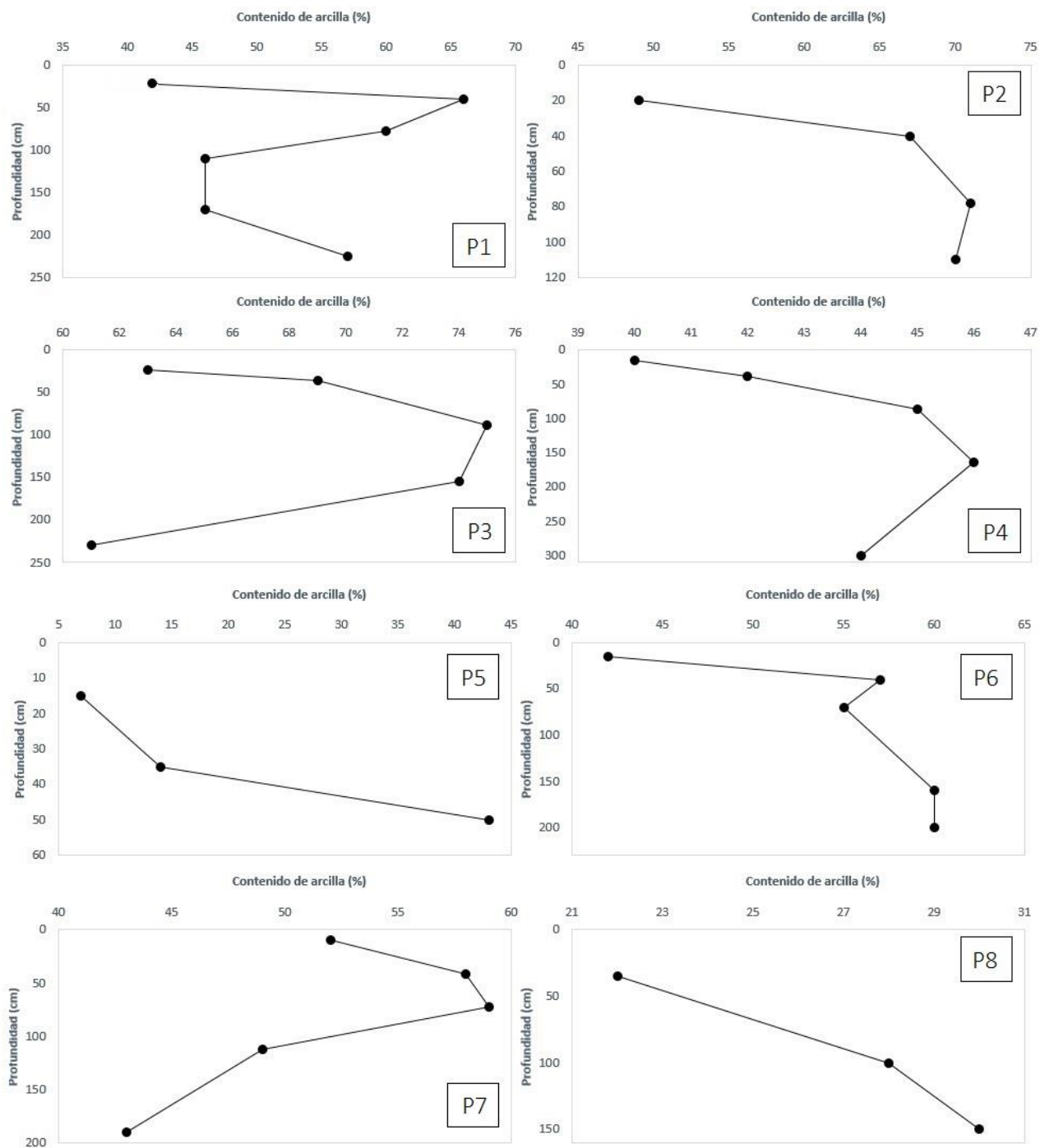


Figura 2.25. Comportamiento del contenido de arcilla (%) a través de la profundidad (cm) para P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 y P8.

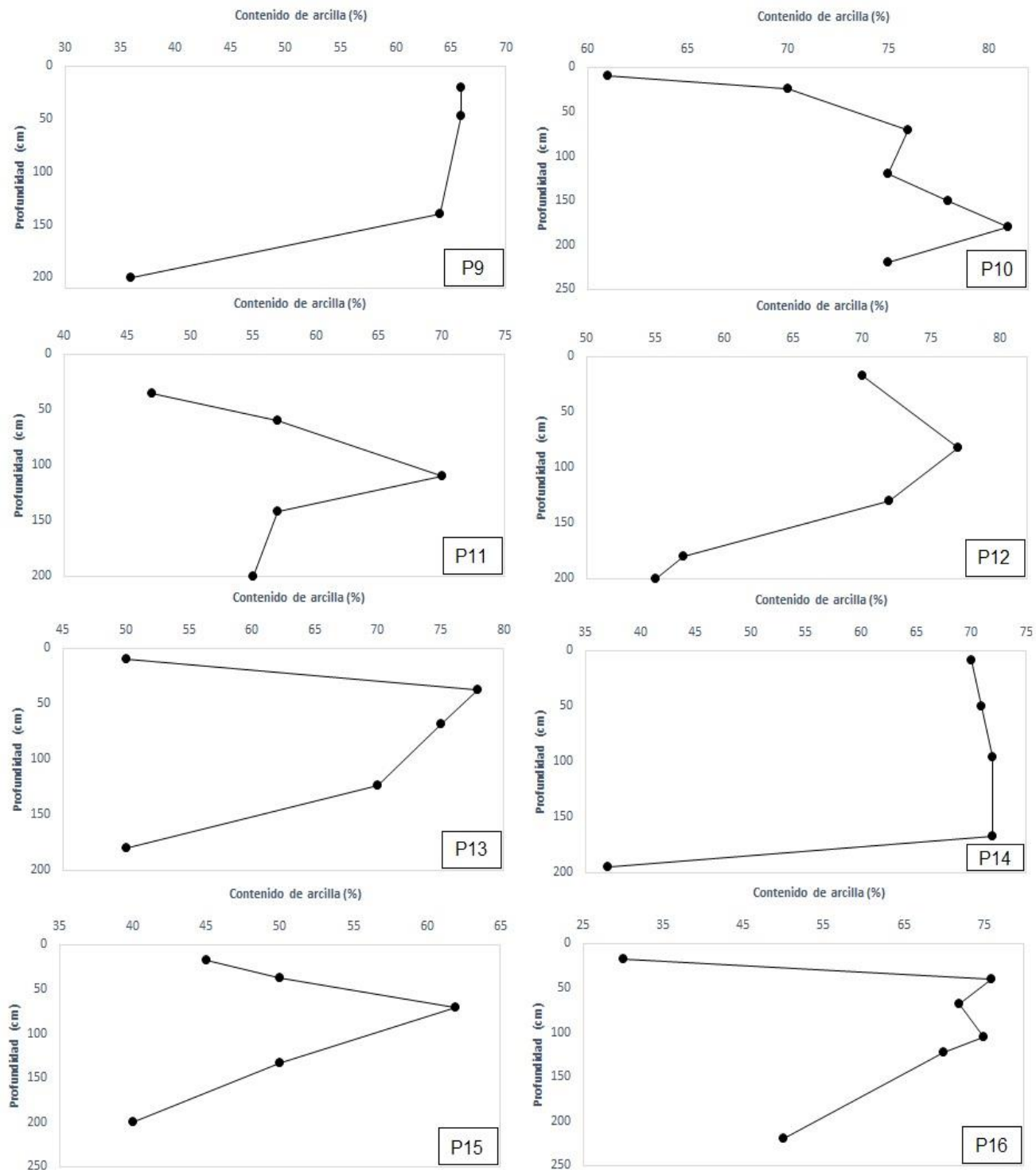


Figura 2.26. Comportamiento del contenido de arcilla (%) a través de la profundidad (cm) para P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15 y P16.

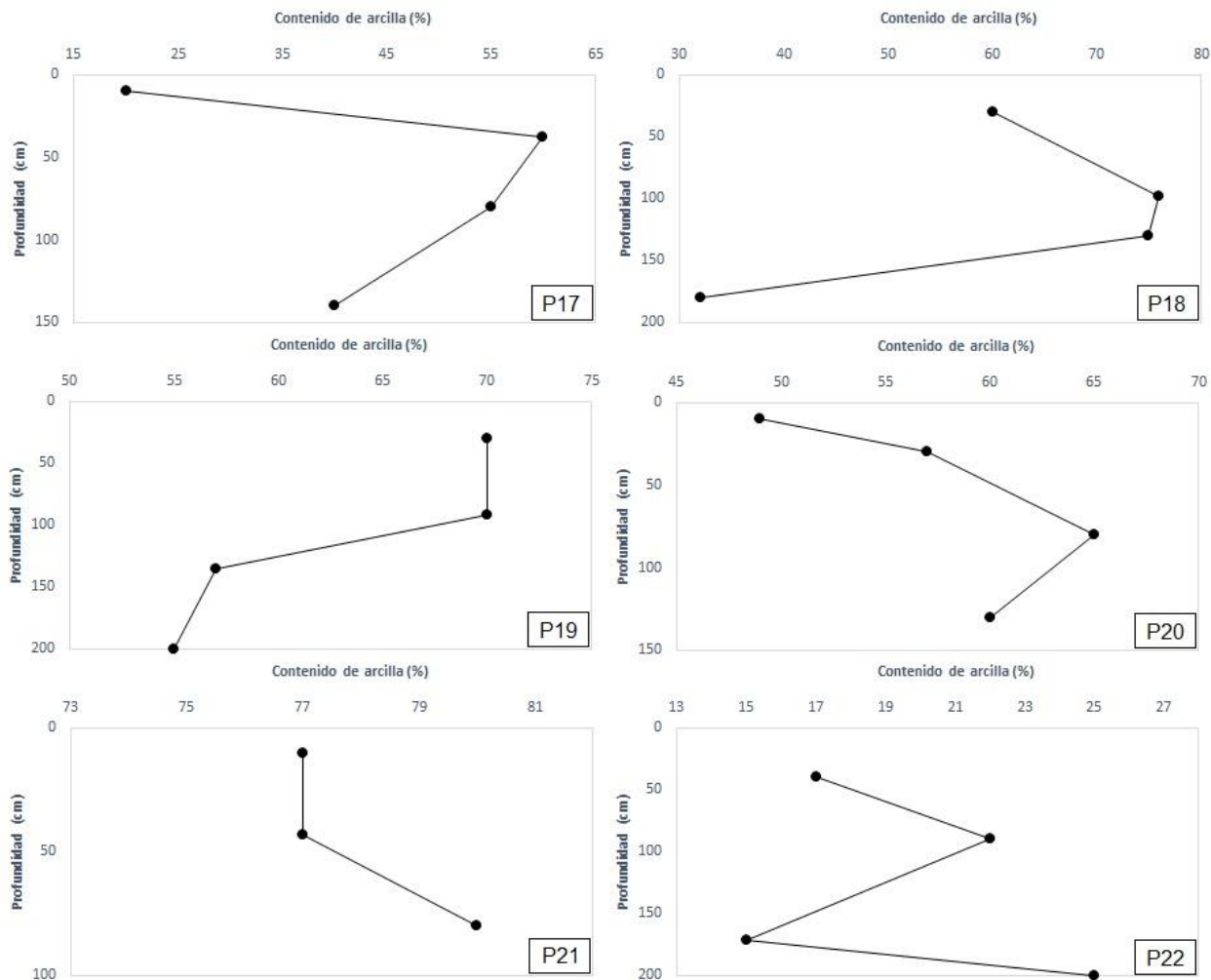


Figura 2.27. Comportamiento del contenido de arcilla (%) a través de la profundidad (cm) para P17, P18, P19, P20, P21 y P22.

En cuanto al comportamiento de la densidad aparente (g/cm^3) con el incremento en profundidad, el perfil del abanico San Juancito (P1) mostró una tendencia a incrementar con la profundidad, pasando de $1,0 \text{ g/cm}^3$ a $1,3 \text{ g/cm}^3$, mientras que Bt2 y BC no siguieron esta tendencia. Para el perfil Volcán (P2) se observó un incremento en la densidad aparente del segundo horizonte respecto al primero, que pasó de $0,9 \text{ g/cm}^3$ a $1,2 \text{ g/cm}^3$, disminuyó en el tercer horizonte a $1,1 \text{ g/cm}^3$ y volvió a incrementar a $1,2 \text{ g/cm}^3$ en el cuarto horizonte. En el perfil Peje (P3) también se presentó un incremento en la densidad de $0,9 \text{ g/cm}^3$ a $1,3 \text{ g/cm}^3$ del primer al segundo horizonte, y disminuyó en el tercero a $1,2 \text{ g/cm}^3$ y se mantuvo en ese valor en los dos horizontes subsuperficiales. El perfil Llano Bonito (P4) se presentó un

incremento de la densidad aparente con el incremento en la profundidad, partiendo de $0,9 \text{ g/cm}^3$ en el primer horizonte hasta $1,4 \text{ g/cm}^3$ al último horizonte.

El perfil El Ángel Arriba (P5), por no ser un suelo de formación pedológicamente reciente, y debido al alto porcentaje de roca en sus horizontes, solamente permitió tomar muestras en los dos primeros horizontes, y cuya densidad fue de $0,7 \text{ g/cm}^3$ en el primer horizonte y $0,4 \text{ g/cm}^3$ en el segundo. El perfil El Ángel (P6), presentó una tendencia distinta a los otros perfiles estudiados, ya que disminuyó con respecto al incremento de la profundidad, pasando de $0,6 \text{ g/cm}^3$ en el horizonte Ap a $0,3 \text{ g/cm}^3$ en horizonte C.

El perfil Guadalajara (P7), al igual que el perfil Llano Bonito (P4), presentó un incremento de la densidad aparente con el incremento en la profundidad, partiendo de $1,2 \text{ g/cm}^3$ en el primer horizonte hasta $1,5 \text{ g/cm}^3$ al último horizonte. Al igual que el perfil el Ángel Arriba (P5), el perfil Santa María (P8) por no ser un suelo de formación reciente y por su alto porcentaje de roca, solamente se pudo tomar una muestra en el primer horizonte y su densidad fue de $1,1 \text{ g/cm}^3$.

El perfil Convento (P9), Dúrika (P15), río Cañas (P17) y la Ceiba (P20) se da un incremento lineal en la densidad aparente del primer al último horizonte, con valores que van de $0,9 \text{ g/cm}^3$ a $1,4 \text{ g/cm}^3$. En los perfiles Buenos Aires (P10), Alto Guadalajara (P16), quebrada Palma (P18) y Cacao (P19) no hay un comportamiento estable en los valores de densidad aparente, pero estos de mantienen entre $0,9 \text{ g/cm}^3$ y $1,3 \text{ g/cm}^3$.

En los perfiles Cordoncillo (P11), río Azul (P12), Puente (P13), Sabana La Pelona (P14) y Las Juntas (P21) se dan adensamientos en el segundo o tercer horizonte, con valores que varían entre $0,9 \text{ g/cm}^3$ y $1,2 \text{ g/cm}^3$. El perfil Ujarrás (P22) presentó valores de $0,9 \text{ g/cm}^3$ en el primer y segundo horizonte, aumentado en el tercer horizonte a $1,3$ y volviendo a disminuir a $0,9 \text{ g/cm}^3$ en el horizonte designado como enterrado (Ab).

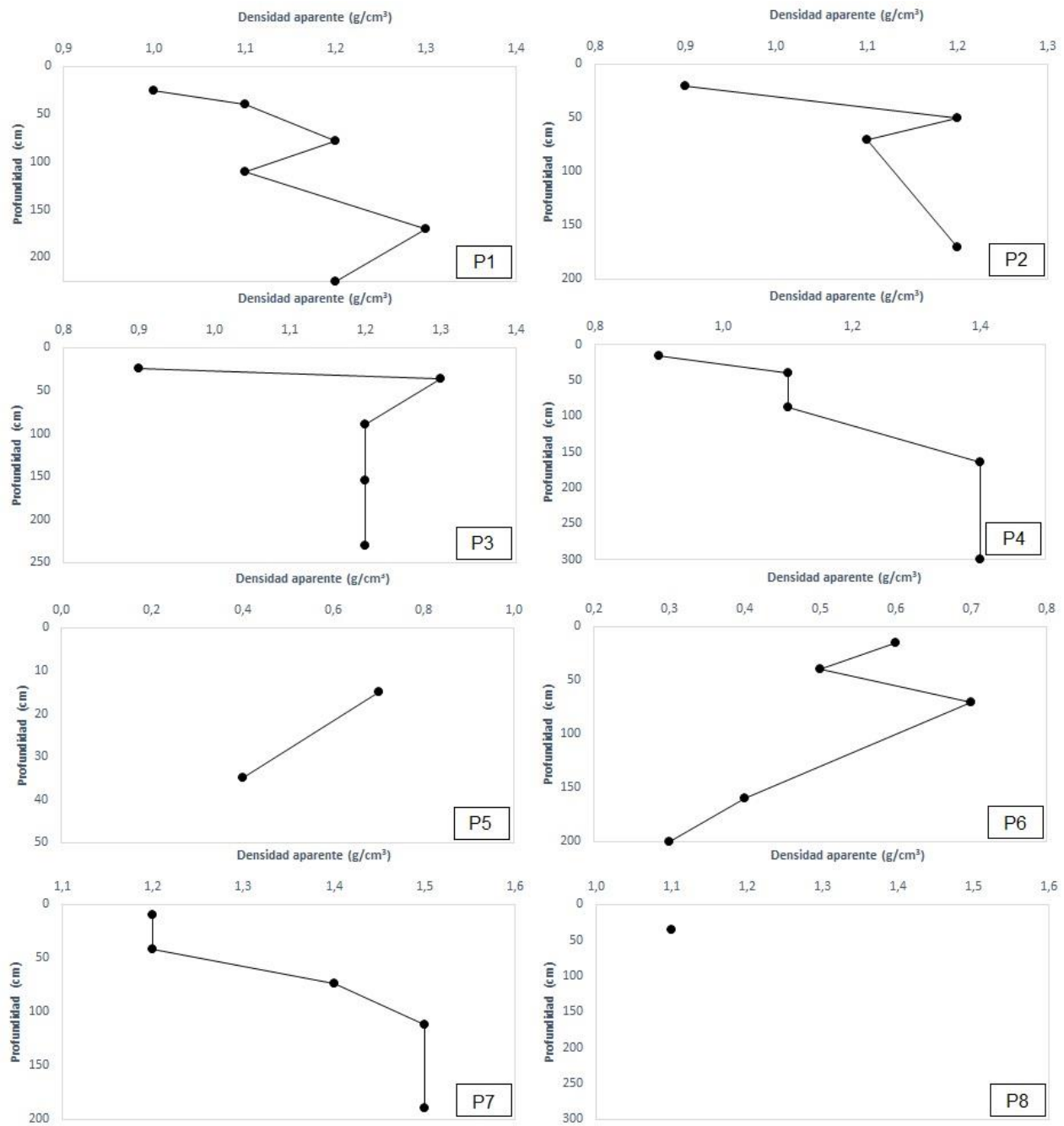


Figura 2.28. Comportamiento de la densidad aparente (g/cm^3) a través de la profundidad (cm) para P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 y P8.

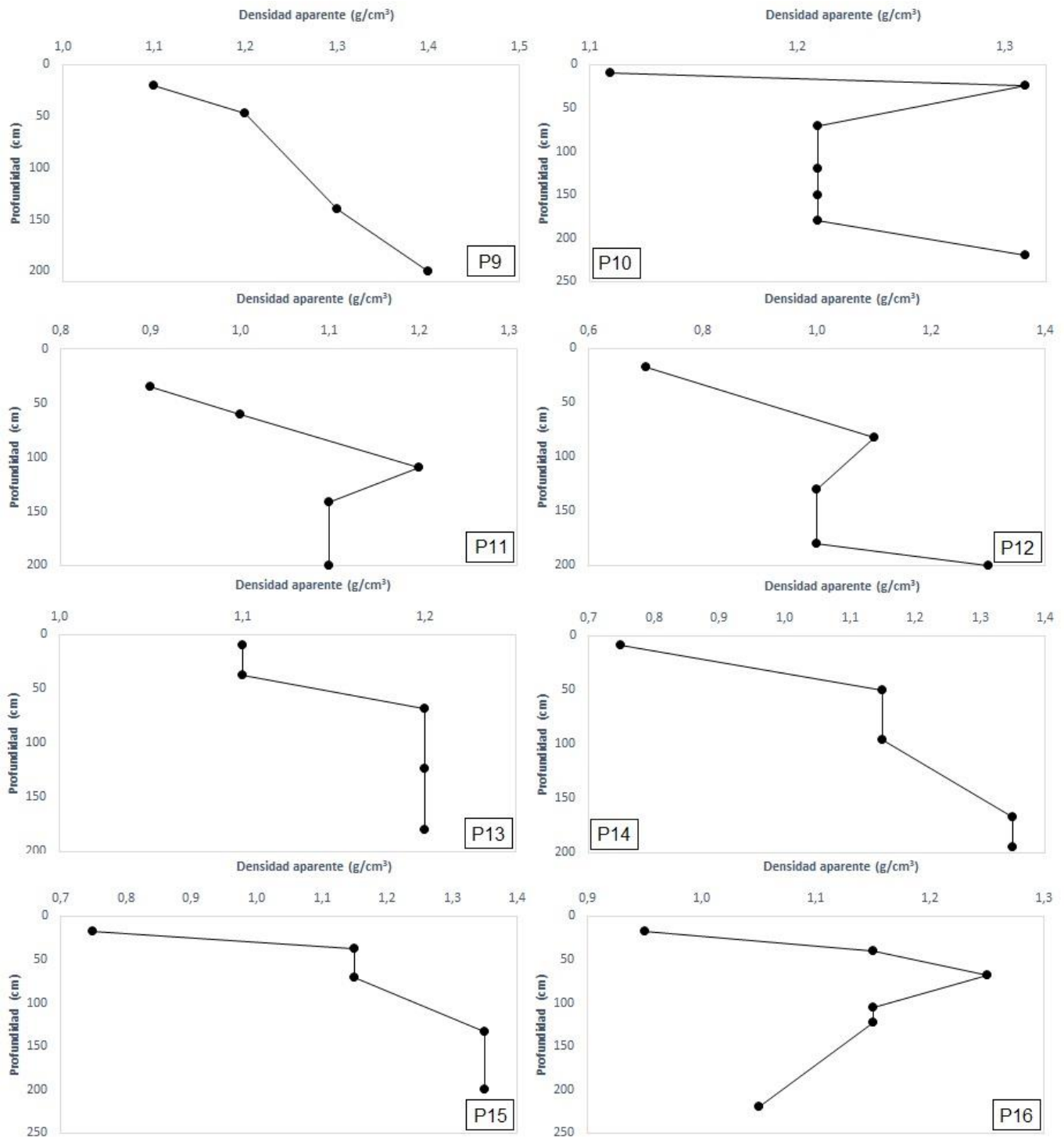


Figura 2.29. Comportamiento de la densidad aparente (g/cm^3) a través de la profundidad (cm) para P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15 y P16.

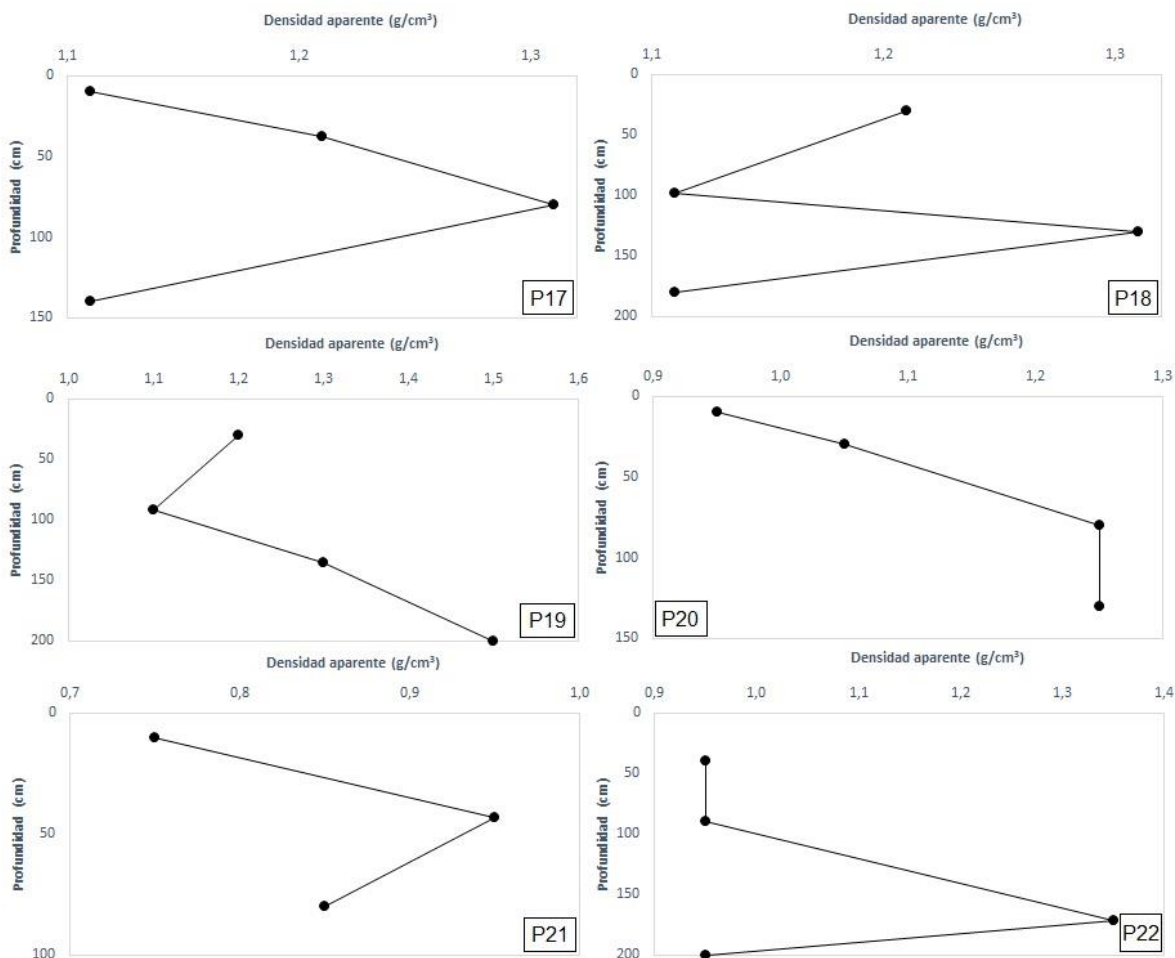


Figura 2.30. Comportamiento de la densidad aparente (g/cm^3) a través de la profundidad (cm) para P17, P18, P19, P20, P21 y P22.

Características químicas de los perfiles en estudio

Las características químicas correspondientes a los perfiles se detallan en los cuadros 2.7 al 2.12. Al evaluar los valores de capacidad de intercambio de cationes (CIC) en estos perfiles, se encontró que los horizontes superficiales (los dos primeros horizontes) presentaron variación entre $9,70 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$ y $26,80 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$, siendo los perfiles de Oxisoles los que presentaron los valores más bajos; mientras que los perfiles de Entisoles presentaron variación entre $11,60 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$ y $30,60 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$. En los perfiles de Ultisoles los valores de CIC fueron muy variables, y los valores oscilan entre los que se encontraron para Entisoles y Oxisoles. Es importante destacar que en los perfiles San Juancito (P1), Llano Bonito (P4), El Ángel (P6), Guadalajara (P7), Convento (P9), Buenos Aires (P10), río Cañas (P17) y

Cacao (P19), se encontró al menos un horizonte con una CIC menor a 10 cmol(+)/kg, lo que se puede asociar a suelos muy meteorizados y de poca fertilidad química.

Por otro lado, la mayoría de los perfiles muestran que los valores de carbono orgánico (CO) presentaron un descenso regular asociado al incremento de la profundidad. Los resultados de los perfiles dieron valores de porcentajes de CO de entre 0,52 % y 5,72 % en el primer horizonte, es decir entre 0,74 % y 8,18 % de materia orgánica (MO). En general, los perfiles presentaron altos contenidos de CO. Los perfiles El Ángel Arriba (P5), Santa María (P8) y Ujarrás (P22), y Cordoncillo (P11) y La Ceiba, mostraron una disminución irregular en los contenidos de CO con el aumento de la profundidad.

En cuanto a porcentaje de saturación de bases (SB), se encontraron valores bajos en todos los horizontes de los perfiles Llano Bonito (P4), El Ángel (P6), Convento (P9), Buenos Aires (P10), Cordoncillo (P11), río Azul (P12), Puente (P13), Sabana La Pelona (P14), Alto Guadalajara (P16), río Cañas (P17), quebrada Palma (P18), en los horizontes superiores del perfil Guadalajara (P7) y en los horizontes subsuperficiales de Las Juntas (P21), donde se obtuvieron porcentajes de entre 0,81 % a 9,04 %. Los perfiles de San Juancito (P1), Volcán (P2), Peje (P3), Dúrika (P15), Cacao (P19) y La Ceiba presentaron porcentajes de SB más altos, entre 10,24 % y 52,68 %. Y los perfiles de El Ángel Arriba (P5), Santa María (P8) y Ujarrás (P22), mostraron mucha variabilidad en los porcentajes de SB, con valores de entre 4,12 % y 64,01 %, pero en términos generales más altos que los demás perfiles.

La mayoría de estos perfiles presentaron pH de bajos a medios con valores entre 4,2 y 6,1, lo que representa un factor limitante para la productividad de estos suelos. La saturación de acidez fue alta en los perfiles San Juancito (P1), Peje (P3), Llano Bonito (P4), El Ángel (P6), Santa María (P8), Convento (P9), Puente (P13), Alto Guadalajara (P16) y río Cañas (P17); media en los perfiles Volcán (P2), Guadalajara (P7), Cordoncillo (P11), quebrada Palma (P18) y Las Juntas (P21); y óptima en los perfiles El Ángel Arriba (P5), río Azul (P12), Sabana La Pelona (P14), Dúrika (P15), la Ceiba (P20) y Ujarrás (P22).

Cuadro 2.7. Características químicas obtenidas para los perfiles P1, P2, P3 y P4.

Horizonte	Profundidad (cm)	pH	Acidez (cmol(+)/L)	CICE	SA (%)	Ca	Mg	K (cmol(+)/kg)	Na	Suma Bases	SB (%)	CIC (cmol(+)/kg)	CO (%)	MO
San Juancito (P1)														
Ap	0-25	4,8	1,59	2,76	58	0,53	0,22	0,25	0,07	1,07	4,53	23,60	5,52	7,89
AB	25-40	5,5	-	-	-	0,96	0,19	0,03	0,14	1,32	10,82	12,20	2,49	3,56
Bt1	40-78	5,6	-	-	-	0,73	0,14	0,01	0,12	1,00	15,11	6,62	1,14	1,63
Bt2	78-110	5,6	-	-	-	0,54	0,11	ND	0,09	0,74	16,52	4,48	0,52	0,74
Bt3	110-170	5,7	-	-	-	0,43	0,10	ND	0,10	0,63	13,49	4,67	0,46	0,66
B/C	170-225	6,1	-	-	-	0,33	0,09	0,01	0,22	0,65	10,67	6,09	0,35	0,50
Volcán (P2)														
Ap	0-20	5,4	0,80	3,63	22	1,56	1,05	0,26	0,08	2,95	13,72	21,50	4,75	6,79
Bt1	20-50	5,4	-	-	-	2,50	0,28	0,07	0,09	2,94	17,09	11,00	1,52	2,17
Bt2	50-70	5,8	-	-	-	3,12	0,55	0,03	0,09	3,79	23,40	16,20	0,79	1,13
B/C	70-170	5,9	-	-	-	3,07	0,76	0,03	0,11	3,97	24,36	16,30	0,64	0,92
Peje (P3)														
Ap	0-24	4,7	1,40	3,46	40	-	-	-	-	-	-	-	2,81	4,02
BA	24-36	5,4	0,12	-	-	1,79	0,22	0,05	0,06	2,12	16,83	12,60	1,40	2,00
Bt1	36-89	5,7	0,08	-	-	2,19	0,38	0,04	0,04	2,65	23,87	11,10	0,95	1,36
Bt2	89-170	5,4	0,09	-	-	1,23	0,10	0,03	0,04	1,40	12,39	11,30	0,52	0,74
Cv	170-230	5,0	0,26	-	-	0,92	0,19	0,03	0,05	1,19	11,33	10,50	0,31	0,44
Llano Bonito (P4)														
Ap	0-15	4,9	0,91	2,76	33	-	-	-	-	-	-	-	3,97	5,68
BA	15-39	5,0	0,91	-	-	0,48	0,12	0,04	0,70	0,70	4,93	14,2	3,10	4,43
Bt	39-87	4,8	0,81	-	-	0,43	0,11	0,03	0,62	0,62	5,00	8,0	2,55	3,65
Bt/C	87-164	4,8	0,28	-	-	0,31	0,08	0,01	0,47	0,57	9,04	5,1	0,61	0,87
Cr/Bt	164-300	5,2	0,10	-	-	0,38	0,09	0,02	0,52	0,52	7,30	7,1	0,23	0,33

CICE: Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva (Acidez+Ca+Mg+K), SA: Porcentaje de Saturación de Acidez (Acidez/CICE)*100

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico. Bases: Ca, Mg, K y Na. CIC y bases determinadas en acetato de amonio 1 N pH 7. MO: Porcentaje de Materia orgánica (% C * 1,43)

Cuadro 2.8. Características químicas obtenidas para los perfiles P5, P6, P7 y P8.

Horizonte	Profundidad (cm)	pH	Acidez (cmol(+)/L)	CICE	SA (%)	Ca	Mg	K (cmol(+)/kg)	Na	Suma Bases	SB (%)	CIC (cmol(+)/kg)	CO (%)	MO
El Ángel Arriba (P5)														
Ap	0-15	5,4	0,24	5,02	5	3,46	0,45	0,09	0,07	4,07	24,67	16,50	4,16	5,95
A2	15-35	-	-	-	-	0,52	0,18	0,16	0,08	0,94	4,14	22,70	4,87	6,96
C/A	35-50	-	-	-	-	0,40	0,12	0,05	0,06	0,63	4,12	15,30	2,22	3,17
El Ángel (P6)														
Ap	0-15	5,0	1,09	2,22	49	0,60	0,20	0,21	0,10	1,11	7,30	15,20	4,02	5,75
Bt1	15-40	5,4	-	-	-	0,31	0,10	0,03	0,06	0,50	4,20	11,90	2,06	2,95
Bt2	40-70	5,2	-	-	-	0,31	0,08	0,01	0,05	0,45	5,06	8,90	1,13	1,62
BC	70-160	5,2	-	-	-	0,49	0,09	0,01	0,05	0,64	7,13	8,98	0,49	0,64
C	160-200	5,4	-	-	-	0,43	0,08	ND	0,05	0,56	4,34	12,90	0,27	0,39
Guadalajara (P7)														
Ap	0-10	5,3	0,44	1,59	28	-	-	-	-	-	-	-	2,56	3,66
Bt/A	10-40	5,1	0,32	-	-	0,42	0,11	0,03	0,04	0,60	5,31	11,30	2,00	2,86
Bt1	40-74	5,0	0,12	-	-	0,38	0,09	0,02	0,04	0,53	6,41	8,30	1,32	1,89
Bt2	74-112	5,4	0,10	-	-	0,45	0,11	0,05	0,04	0,65	15,33	4,20	0,42	0,60
Bt3	112-190	5,2	0,08	-	-	0,36	0,10	0,02	0,05	0,53	12,59	4,20	0,24	0,34
Santa María (P8)														
A	0-35	4,9	2,70	4,44	47	-	-	-	-	-	-	-	3,78	5,41
C1/A	35-100	4,8	1,39	-	-	0,98	0,24	0,09	0,05	1,36	6,42	21,20	3,61	5,16
C2/A	100-150	5,2	0,80	-	-	4,77	1,18	0,35	0,05	6,35	26,24	24,20	5,16	7,38
C3/A	150-200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	200-300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

CICE: Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva (Acidez+Ca+Mg+K), SA: Porcentaje de Saturación de Acidez (Acidez/CICE)*100

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico. Bases: Ca, Mg, K y Na. CIC y bases determinadas en acetato de amonio 1 N pH 7. MO: Porcentaje de Materia orgánica (% C * 1,43)

Cuadro 2.9. Características químicas obtenidas para los perfiles P9, P10, P11 y P12.

Horizonte	Profundidad (cm)	pH	Acidez (cmol(+)/L)	CICE	SA (%)	Ca	Mg	K (cmol(+)/kg)	Na	Suma Bases	SB (%)	CIC (cmol(+)/kg)	CO (%)	MO
Convento (P9)														
Ap	0-20	4,6	1,34	2,04	66	0,36	0,10	0,07	0,05	0,58	3,37	17,20	3,68	5,26
Bt1	20-47	4,4	-	-	-	0,35	0,09	0,04	0,04	0,52	4,03	12,90	2,49	3,56
Bt2	47-140	5,0	-	-	-	0,32	0,08	0,02	0,04	0,46	5,82	7,90	1,13	1,62
B/C	140-200	4,8	-	-	-	0,31	0,07	0,01	0,04	0,43	11,94	3,60	0,28	0,40
Buenos Aires (P10)														
Ap	0-10	5,3	1,33	2,11	63	0,45	0,17	0,11	0,05	0,78	4,36	17,70	3,78	5,41
AB	10-24	5,2	-	-	-	0,29	0,08	0,03	0,04	0,44	3,83	11,50	1,47	2,10
Bt1	24-70	5,5	-	-	-	0,29	0,07	0,02	0,05	0,43	1,58	10,60	0,69	0,99
Bt2	70-120	5,5	-	-	-	0,27	0,07	0,01	0,04	0,39	1,17	9,80	0,29	0,41
Bt3	120-150	5,5	-	-	-	0,30	0,07	0,05	0,05	0,47	0,81	10,60	0,25	0,36
Bt4	150-180	5,5	-	-	-	0,35	0,08	0,02	0,05	0,50	3,11	12,40	0,31	0,44
BC	180-220	5,4	-	-	-	0,25	0,07	0,02	0,05	0,43	2,95	11,80	0,25	0,36
BCr	220-240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordoncillo (P11)														
Ap	0-35	5,0	0,87	3,37	26	1,29	0,32	0,09	0,05	1,75	7,35	23,80	6,42	9,18
Bt1	35-60	5,2	-	-	-	0,26	0,09	0,03	0,04	0,42	3,28	12,80	1,98	2,83
Bt2	60-110	5,0	-	-	-	0,30	0,08	0,03	0,04	0,45	3,26	11,00	0,49	0,70
Bt3	110-142	4,9	-	-	-	0,31	0,09	0,02	0,04	0,46	3,33	13,80	2,35	3,36
BC	142-200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Río Azul (P12)														
Ap	0-17	4,8	2,90	8,59	5	0,36	0,20	0,13	0,05	0,74	3,18	23,30	4,96	6,09
Bt1	17-82	5,0	-	-	-	0,31	0,10	0,06	0,06	0,53	3,66	12,20	1,05	1,50
Bt2	82-130	5,0	-	-	-	0,31	0,08	0,02	0,05	0,46	2,58	11,30	0,36	0,51
Bt3	130-180	4,9	-	-	-	0,35	0,10	0,02	0,05	0,52	1,99	15,20	0,41	0,59
BC	180-200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

CICE: Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva (Acidez+Ca+Mg+K), SA: Porcentaje de Saturación de Acidez (Acidez/CICE)*100
CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico. Bases: Ca, Mg, K y Na. CIC y bases determinadas en acetato de amonio 1 N pH 7. MO: Porcentaje de Materia orgánica (% C * 1,43)

Cuadro 2.10. Características químicas obtenidas para los perfiles P13, P14, P15 y P16.

	Profundidad (cm)	pH	Acidez (cmol(+)/L)	CICE	SA (%)	Ca	Mg	K (cmol(+)/kg)	Na	Suma Bases	SB (%)	CIC (cmol(+)/kg)	CO (%)	MO
Puente (P13)														
Ap	0-10	4,8	2,44	3,27	75	0,39	0,17	0,08	0,04	0,68	3,86	17,60	2,63	3,76
Bt1	10-37	4,8	-	-	-	0,39	0,13	0,05	0,05	0,62	2,84	12,30	1,05	1,50
Bt2	37-68	4,7	-	-	-	0,39	0,12	0,04	0,04	0,59	3,06	11,90	0,53	0,76
Bt3	68-124	5,1	-	-	-	0,31	0,08	0,02	0,05	0,46	2,58	15,20	0,30	0,43
BC	124-180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sabana La Pelona (P14)														
Ap	0-9	5,5	0,44	8,59	5	0,36	0,20	0,13	0,05	0,74	3,18	23,30	4,69	6,71
Bt1	9-50	5,2	-	-	-	0,41	0,35	0,10	0,05	0,91	4,97	11,00	0,86	1,23
Bt2	50-96	5,7	-	-	-	0,35	0,15	0,31	0,05	0,86	4,48	11,10	0,29	0,41
Bt3	96-167	5,5	-	-	-	0,32	0,11	0,10	0,04	0,57	2,86	15,50	0,16	0,23
BC	167-195	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dúrika (P15)														
Ap	0-18	5,7	0,14	12,63	1	7,20	2,27	0,58	0,04	10,09	37,65	26,80	5,72	8,18
AB	18-38	5,1	2,17	-	-	3,03	0,75	0,19	0,04	4,01	21,33	18,80	1,83	2,62
Bt1	38-70	5,2	2,99	-	-	2,38	0,42	0,13	0,05	2,98	17,43	17,10	1,09	1,56
Bt2	70-133	5,3	6,57	-	-	1,29	0,31	0,05	0,04	1,69	10,50	16,10	0,42	0,60
CB	133-200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alto Guadalajara (P16)														
Ap	0-18	5,0	1,57	2,72	58	0,51	0,15	0,06	0,04	0,76	4,15	18,30	3,26	4,66
A/C	18-40	5,2	1,18	-	-	0,35	0,09	0,02	0,05	0,51	3,62	14,10	1,14	1,63
2Bt1	40-68	5,3	1,75	-	-	0,46	0,11	0,02	0,06	0,65	5,20	11,50	0,63	0,90
2Bt2	68-105	5,1	1,33	-	-	0,37	0,11	0,02	0,05	0,55	3,85	11,40	0,63	0,90
2BC	105-122	5,2	2,10	-	-	0,41	0,11	0,02	0,06	0,60	3,75	16,00	0,28	0,40
2C	122-220	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CICE: Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva (Acidez+Ca+Mg+K), SA: Porcentaje de Saturación de Acidez (Acidez/CICE)*100														
CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico. Bases: Ca, Mg, K y Na. CIC y bases determinadas en acetato de amonio 1 N pH 7. MO: Porcentaje de Materia orgánica (% C * 1,43)														

Cuadro 2.11. Características químicas obtenidas para los perfiles P17, P18, P19 y P20.

Horizonte	Profundidad (cm)	pH	Acidez (cmol(+)/L)	CICE	SA (%)	Ca	Mg	K (cmol(+)/kg)	Na	Suma Bases	SB (%)	CIC (cmol(+)/kg)	CO (%)	MO
Río Cañas (P17)														
Ap	0-10	5,0	0,74	1,78	42	0,40	0,14	0,06	0,03	0,63	6,49	9,70	2,02	2,89
Bt1	10-38	5,0	0,63	-	-	0,39	0,11	0,05	0,05	0,60	6,54	9,20	1,72	2,46
Bt2	38-80	5,0	0,18	-	-	0,32	0,08	0,03	0,04	0,47	6,79	6,90	0,88	1,26
BC	80-140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quebrada Palma (P18)														
Ap	0-30	4,8	0,52	2,39	22	0,92	0,53	0,09	0,04	1,58	7,12	12,20	0,52	0,74
Bt	30-98	4,5	1,28	-	-	0,40	0,13	0,06	0,03	0,62	3,13	12,00	0,27	0,39
BC	98-130	4,7	1,33	-	-	0,41	0,13	0,08	0,04	0,66	5,59	11,80	0,21	0,30
C	130-180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cacao (P19)														
Ap	0-30	5,3	0,31	2,74	11	1,27	0,31	0,11	0,03	1,72	10,24	16,80	3,09	4,42
Bt	30-92	5,5	0,13	-	-	1,02	0,27	0,02	0,03	1,34	14,89	9,00	-	-
Bt/C	92-135	5,5	0,11	-	-	2,57	0,64	0,06	0,31	3,58	22,10	16,20	-	-
2Bt/C	135-200	5,4	0,15	-	-	0,32	0,10	0,01	0,04	0,47	2,28	20,60	-	-
La Ceiba (P20)														
Ap	0-10	5,7	0,25	12,13	2	9,28	2,20	0,47	0,06	12,01	52,68	22,80	3,88	5,55
Bt1	10-30	5,4	12,81	-	-	0,40	0,17	0,04	0,05	0,66	2,92	22,60	0,28	0,40
Bt2	30-80	5,3	0,88	-	-	7,96	1,76	0,16	0,07	9,95	43,26	23,00	2,68	3,83
Bt3	80-130	5,2	9,18	-	-	0,43	0,21	0,13	0,05	0,82	3,43	21,00	0,73	1,04

CICE: Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva (Acidez+Ca+Mg+K), SA: Porcentaje de Saturación de Acidez (Acidez/CICE)*100

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico. Bases: Ca, Mg, K y Na. CIC y bases determinadas en acetato de amonio 1 N pH 7. MO: Porcentaje de Materia orgánica (% C * 1,43)

Cuadro 2.12. Características químicas obtenidas para los perfiles P21 y P22.

Horizonte	Profundidad (cm)	pH	Acidez (cmol(+)/L)	CICE	SA (%)	Ca	Mg	K (cmol(+)/kg)	Na	Suma Bases	SB (%)	CIC (cmol(+)/kg)	CO (%)	MO
Las Juntas (P21)														
Ap	0-10	5,0	0,54	2,55	21	1,14	0,55	0,08	0,04	1,81	12,40	14,60	2,05	2,93
Bt1	10-43	4,2	1,58	-	-	0,57	0,30	0,10	0,05	1,02	6,75	15,10	2,13	3,05
Bt2	43-80	4,5	1,30	-	-	0,77	0,52	0,06	0,05	1,40	9,09	15,40	2,15	3,07
Ujarrás (P22)														
Ap	0-40	5,8	0,37	7,91	5	9,18	1,21	0,32	0,08	10,79	35,26	30,60	4,99	7,14
A2	40-90	5,9	0,18	-	-	14,58	2,41	0,36	0,06	17,41	64,01	27,20	4,89	6,99
CB	90-172	6,0	1,53	-	-	2,00	0,25	0,09	0,07	2,41	20,78	11,60	0,68	0,97
Ab	172-200	6,0	0,54	-	-	5,13	0,69	0,08	0,08	5,98	27,18	22,00	1,90	2,72
CICE: Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva (Acidez+Ca+Mg+K), SA: Porcentaje de Saturación de Acidez (Acidez/CICE)*100														
CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico. Bases: Ca, Mg, K y Na. CIC y bases determinadas en acetato de amonio 1 N pH 7. MO: Porcentaje de Materia orgánica (% C * 1,43)														

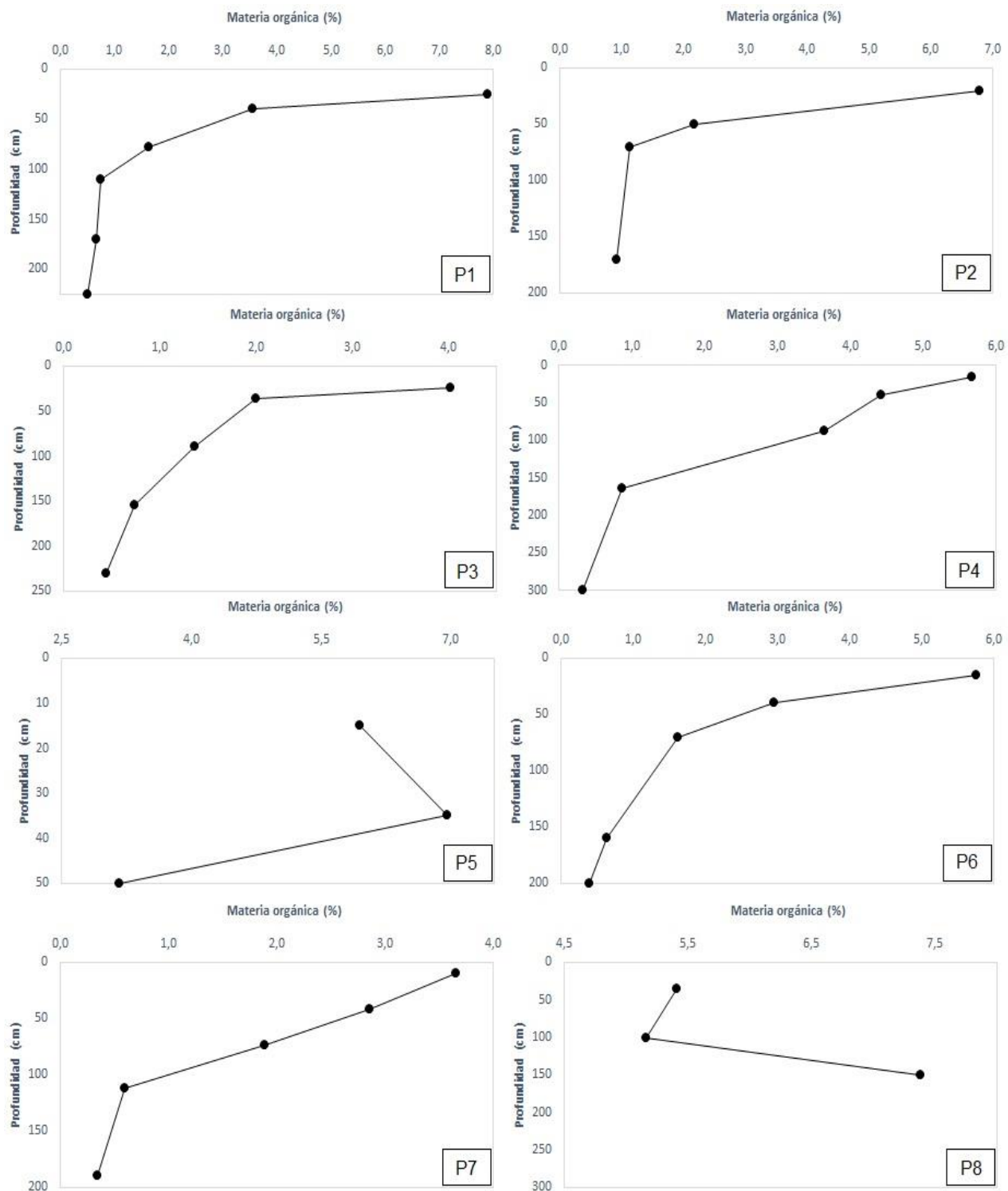


Figura 2.31. Comportamiento de los contenidos de materia orgánica (%) a través de la profundidad (cm) para P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 y P8.

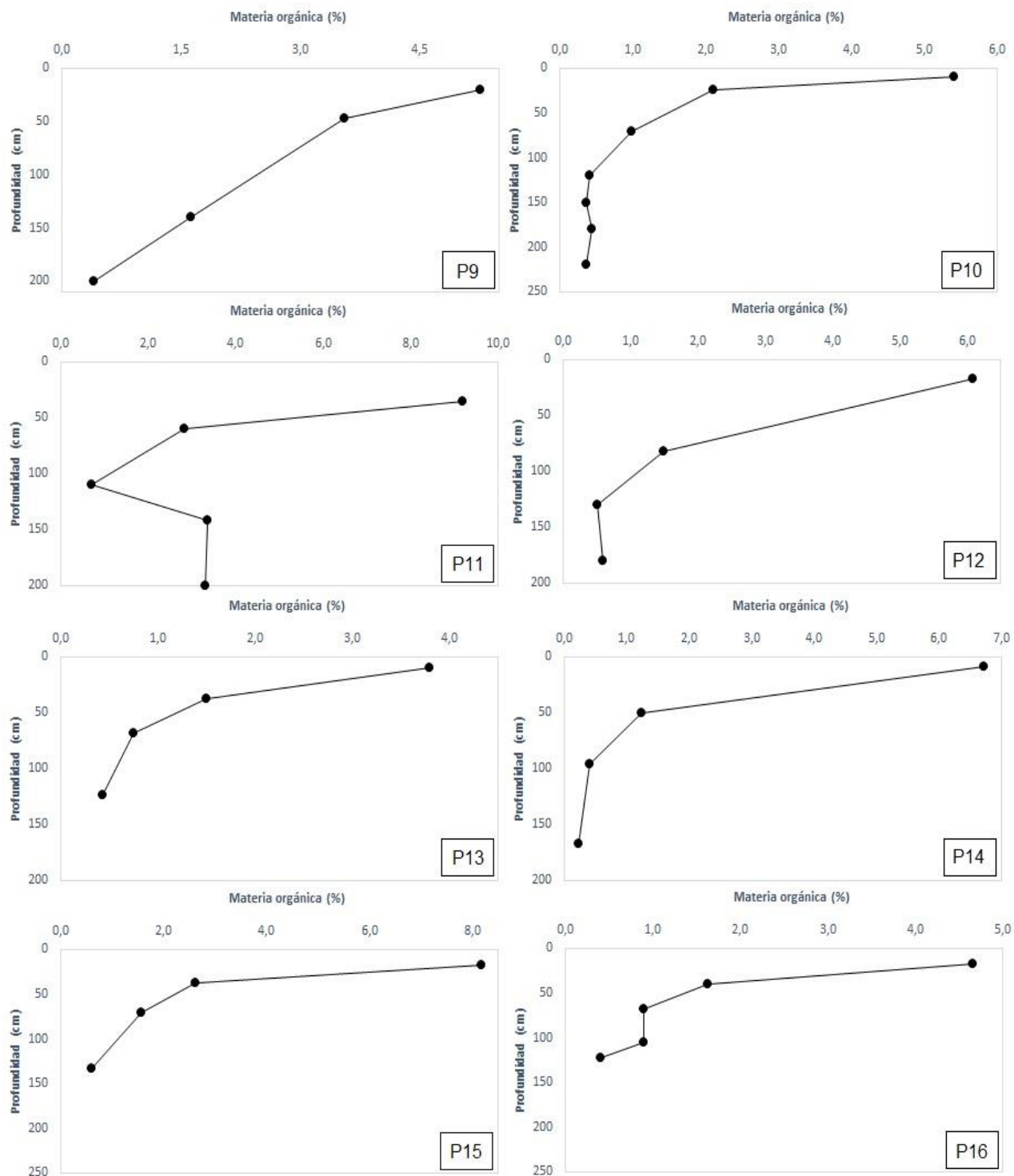


Figura 2.32. Comportamiento de los contenidos de materia orgánica (%) a través de la profundidad (cm) para P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15 y P16.

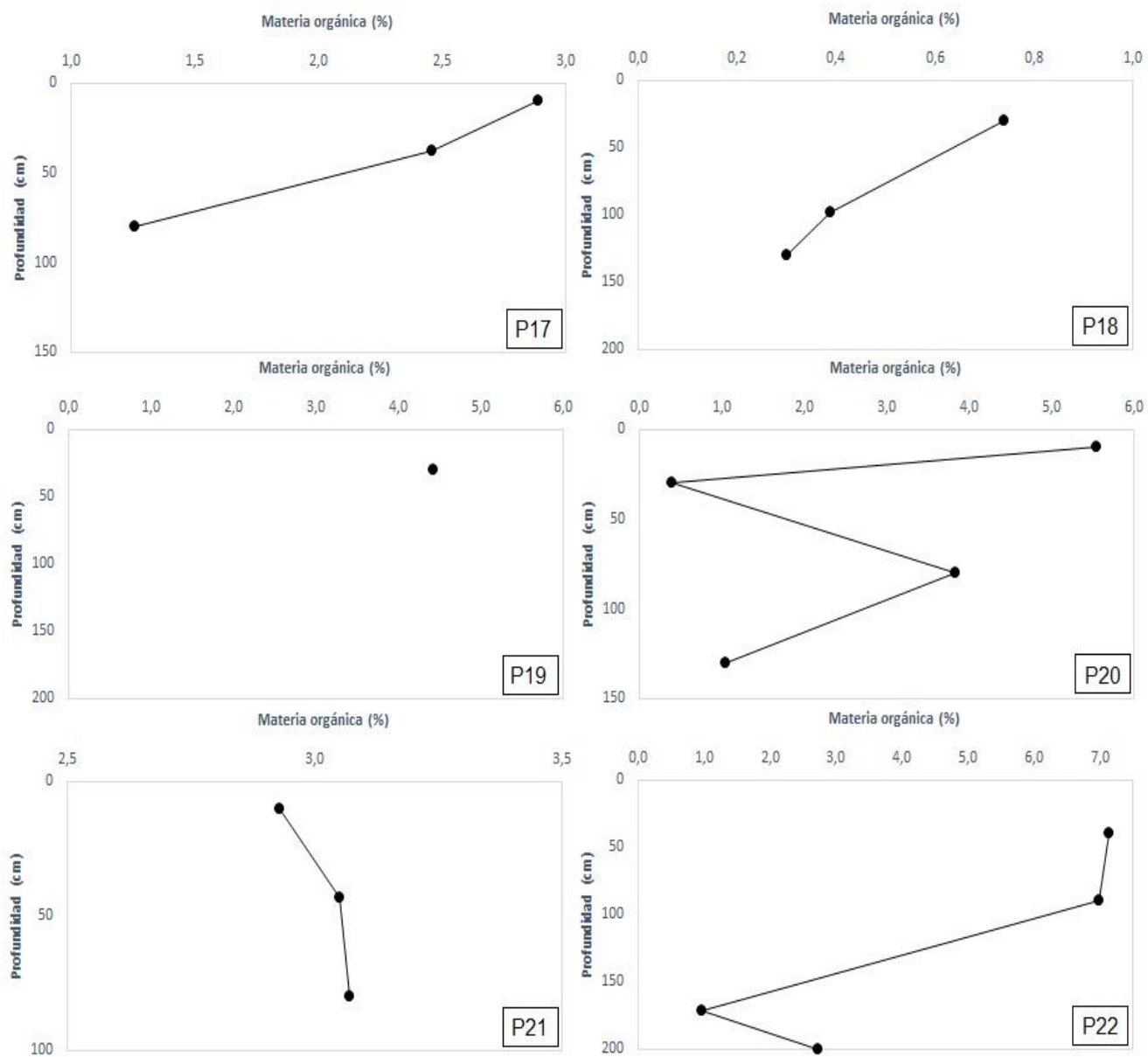


Figura 2.33. Comportamiento de los contenidos de materia orgánica (%) a través de la profundidad (cm) para P17, P18, P19, P20, P21 y P22.

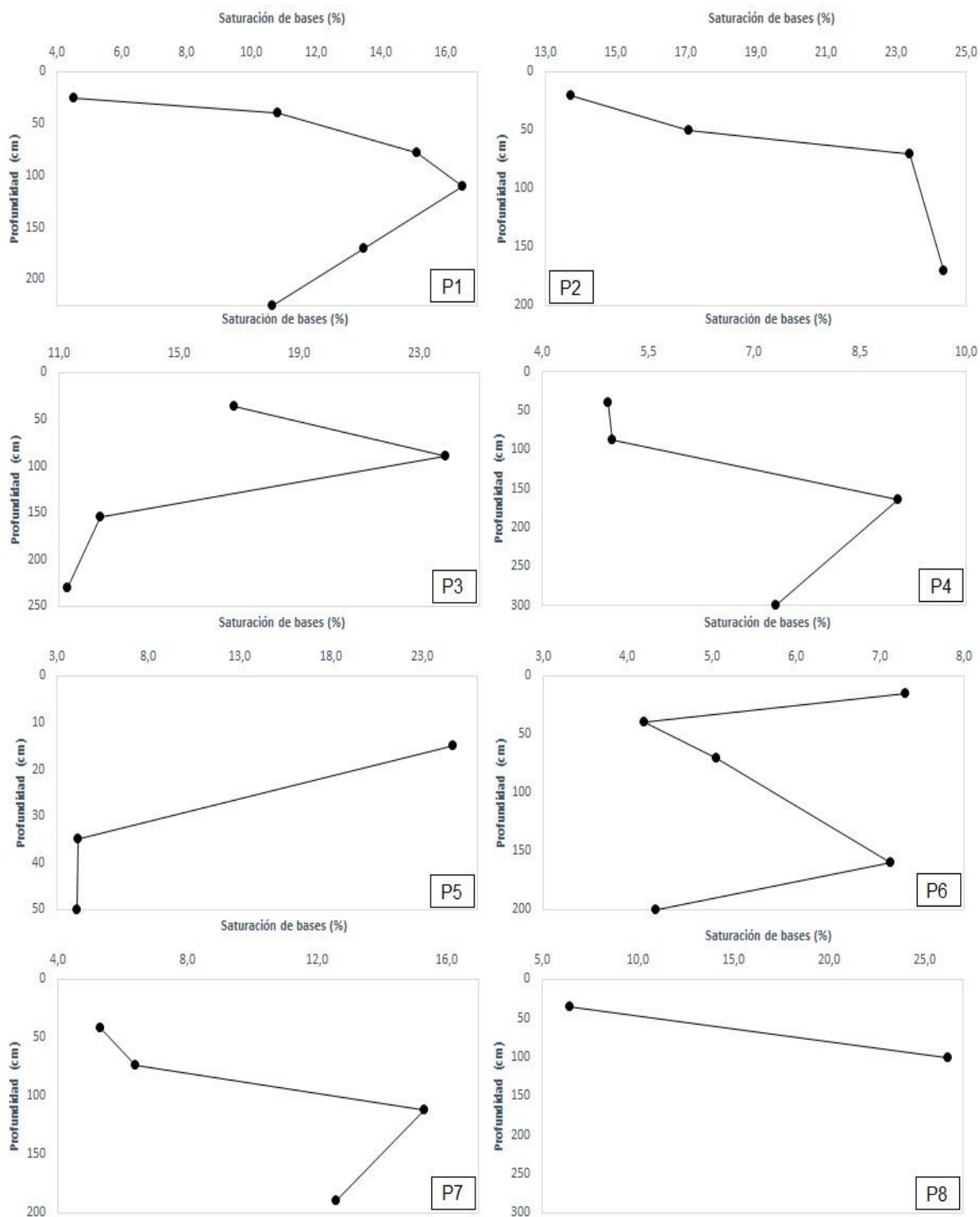


Figura 2.34. Comportamiento de la saturación de bases (%) a través de la profundidad (cm) para P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 y P8.

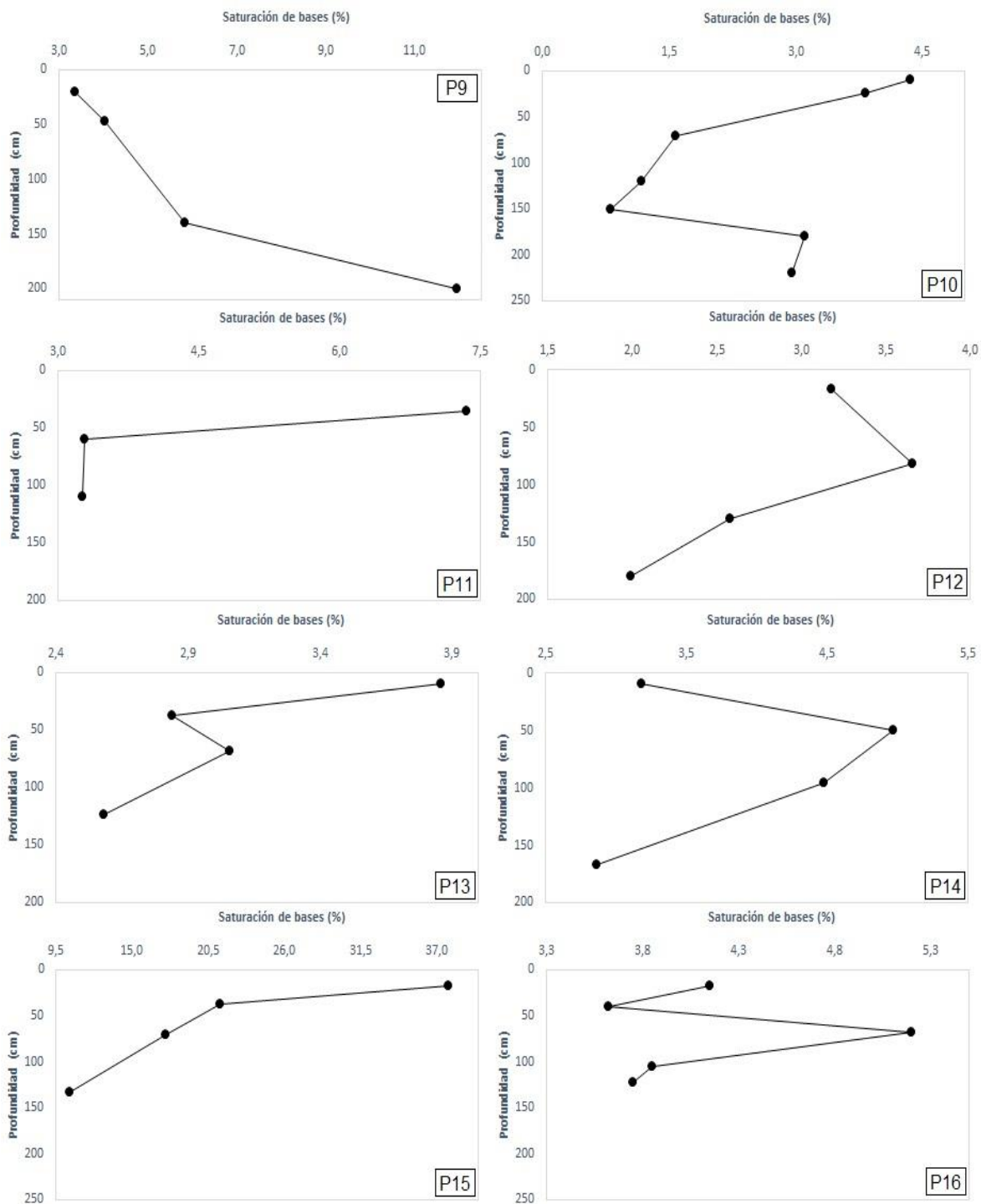


Figura 2.35. Comportamiento de la saturación de bases (%) a través de la profundidad (cm) para P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15 y P16.

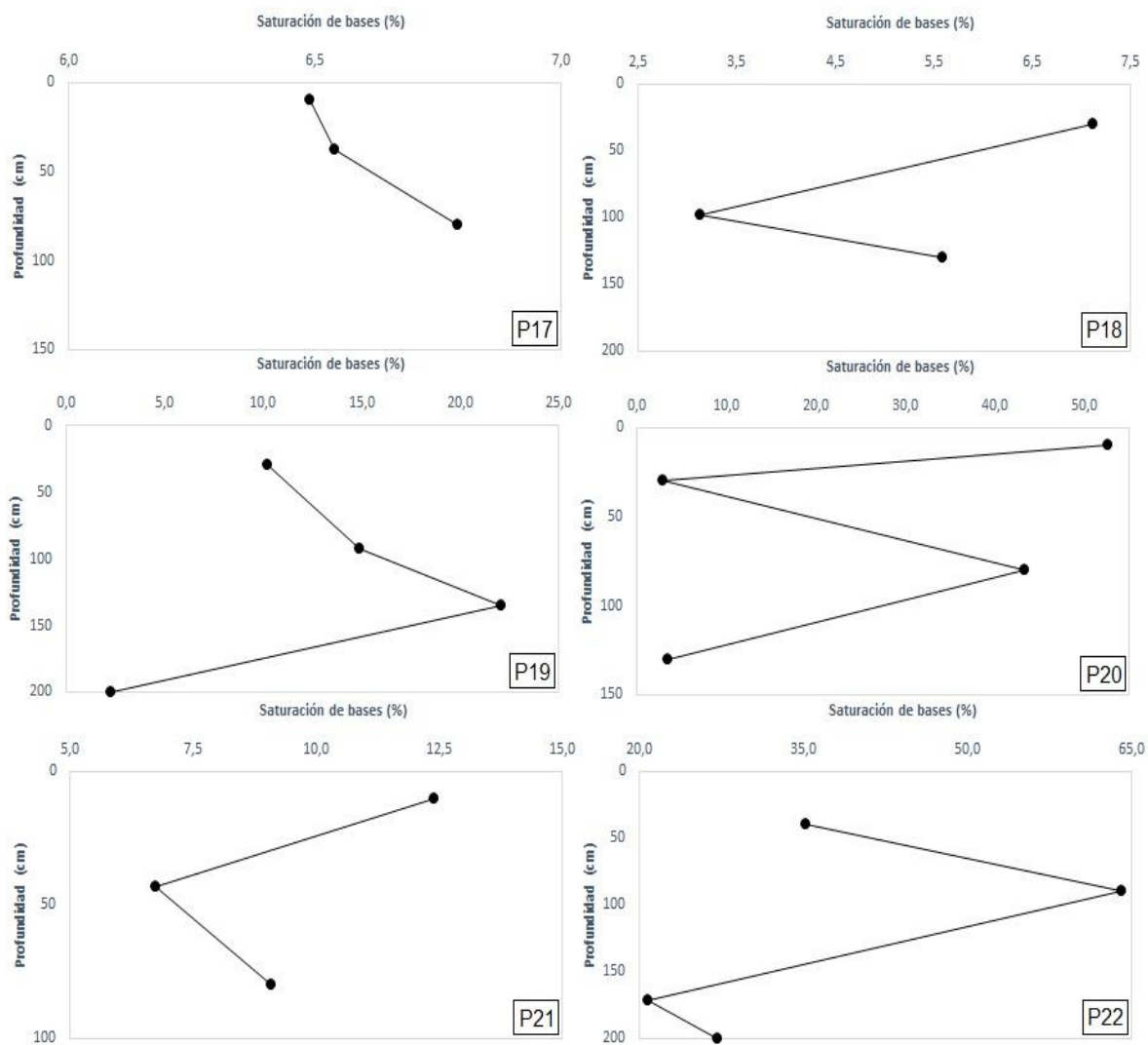


Figura 2.36. Comportamiento de la saturación de bases (%) a través de la profundidad (cm) para P17, P18, P19, P20, P21 y P22.

Todos los perfiles San Juancito (P1), Peje (P3), Llano Bonito (P4), Santa María (P8), Convento (P9), río Azul (P12), Puente (P13) y quebrada Palma (P18), presentaron valores de pH por debajo de 5 por lo que son suelos que se pueden considerar ácidos; mientras que los perfiles Volcán (P2), El Ángel Arriba (P5), El Ángel (P6), Guadalajara (P7), Buenos Aires (P10), Cordoncillo (P11), Sabana La Pelona (P14), Dúrika (P15), Alto Guadalajara (16), río Cañas (P17), Cacao (P19), La Ceiba (P20), Las Juntas (P21) y Ujarrás (P22), tienen pH medios. Lo anterior se muestra del cuadro 2.13 al 2.15.

En cuanto a las bases intercambiales, en términos generales, los perfiles son de baja fertilidad; solamente con valores por debajo de los puntos críticos de Molina y Meléndez (2002) (anexo 1). Aunque hay perfiles como El Ángel Arriba (P5) y Ujarrás que presentaron valores por encima del valor crítico de calcio (Ca); Sabana La Pelona con valores por encima del valor crítico de magnesio (Mg) y potasio (K); San Juancito (P1), Volcán (P2) y Peje (P3) con valores por encima del valor crítico de potasio (K); y los perfiles Dúrika (P15) y La Ceiba (P20) con valores por encima del valor crítico de estos tres elementos.

Todos los perfiles presentaron valores por debajo del nivel crítico de fósforo (P). A excepción de los perfiles Cordoncillo (P9) y Sabana La Pelona (P14), los valores de zinc (Zn) fueron más bajos que el nivel crítico. Los perfiles El Ángel Arriba (P5), Guadalajara (P7), Convento (P9), Buenos Aires (P10), río Cañas (P17), quebrada Palma (P18), Cacao (P19), Las Juntas (P21) y Ujarrás (P22), presentaron contenidos más bajos de manganeso (Mn) que el nivel crítico de este elemento. Finalmente, todos los perfiles estudiados presentaron valores por encima de los niveles críticos de cobre (Cu) y de hierro (Fe).

Cuadro 2.13. Fertilidad disponible en el primer horizonte de los perfiles estudiados.

Perfil		San Juancito (P1)	Volcán (P2)	Peje (P3)	Llano Bonito (P4)	El Ángel Arriba (P5)	El Ángel (P6)	Guadalajara (P7)	Santa María (P8)
Horizonte		Ap	Ap	Ap	A	Ap	Ap	Ap	A
Profundidad (cm)		0-25	0-20	0-24	0-15	0-15	0-15	0-10	0-35
pH		4,8	5,4	4,7	4,9	5,4	5,0	5,3	4,9
Conductividad eléctrica (mS/cm)		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1
Fertilidad disponible (cmol(+)/kg de suelo)									
Nivel crítico									
Ca	4,0	0,72	1,63	1,44	1,40	4,14	0,77	0,72	1,81
Mg	1,0	0,25	0,98	0,40	0,34	0,55	0,24	0,24	0,46
K	0,2	0,20	0,22	0,23	0,11	0,09	0,12	0,19	0,10
Acidez	0,5	1,59	3,63	1,39	0,91	0,24	1,09	0,44	2,07
Saturación de acidez (%)	-	58	22	40	33	5	49	28	47
Fósforo y elementos menores (mg(+)/ml)									
Nivel crítico									
P	10	1	1	2	2	2	ND	ND	1
Zn	3	2,4	2,4	2,4	0,9	1,6	0,6	0,4	ND
Mn	5	13	68	8	8	2	5	1	12
Cu	1	8	10	9	4	6	7	5	3
Fe	10	354	164	142	171	355	232	171	153
* Solución Extractora: KCl-Olsen Modificado, ND: No Detectable.									

Cuadro 2.14. Fertilidad disponible en el primer horizonte de los perfiles estudiados.

Perfil		Convento (P9)	Buenos Aires (P10)	Cordoncillo (P11)	Río Azul (P12)	Puente (P13)	Sabana La Pelona (P14)	Dúrika (P15)	Alto Guadalajara (P16)
Horizonte		Ap	Ap	Ap	A	Ap	Ap	Ap	Ap
Profundidad (cm)		0-20	0-10	0-35	0-17	0-10	0-9	0-18	0-18
pH		4,6	5,3	5,0	4,8	4,8	5,5	5,7	5,0
Conductividad eléctrica (mS/cm)		0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	0,1	0,3	0,1
Fertilidad disponible (cmol(+)/kg de suelo)									
Nivel crítico									
Ca	4,0	0,46	0,50	1,93	0,51	0,54	3,35	8,98	0,81
Mg	1,0	0,15	0,19	0,47	0,27	0,22	3,20	2,97	0,27
K	0,2	0,09	0,09	0,10	0,12	0,07	1,60	0,54	0,07
Acidez	0,5	1,34	1,33	0,87	2,90	2,44	0,44	0,14	1,57
Saturación de acidez (%)	-	66	63	26	76	75	5	1	58
Fósforo y elementos menores (mg(+)/ml)									
Nivel crítico									
P	10	2	1	2	1	1	2	3	1
Zn	3	0,9	0,6	52,4	0,7	1,8	3,4	1,2	0,7
Mn	5	2	1	11	13	20	140	17	6
Cu	1	8	5	26	8	13	9	5	9
Fe	10	429	229	305	407	174	989	124	373
* Solución Extractora: KCl-Olsen Modificado, ND: No Detectable.									

Cuadro 2.15. Fertilidad disponible en el primer horizonte de los perfiles estudiados.

Perfil	Río Cañas (P17)	Quebrada Palma (P18)	Cacao (P19)	La Ceiba (P20)	Las Juntas (P21)	Ujarrás (22)	
Horizonte	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	Ap	
Profundidad (cm)	0-10	0-30	0-30	0-10	0-10	0-40	
pH	5,0	4,8	5,3	5,7	5,0	5,8	
Conductividad eléctrica (mS/cm)	<0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	
Fertilidad disponible (cmol(+)/kg de suelo)							
Nivel crítico							
Ca	4,0	0,70	1,09	1,97	9,08	1,30	6,48
Mg	1,0	0,27	0,68	0,42	2,38	0,66	0,89
K	0,2	0,07	0,10	0,04	0,42	0,05	0,17
Acidez	0,5	0,74	0,52	0,31	0,25	0,54	0,37
Saturación de acidez (%)	-	42	22	11	2	21	5
Fósforo y elementos menores (mg(+)/ml)							
Nivel crítico							
P	10	1	ND	1	1	2	1
Zn	3	2,4	0,5	1,3	2,2	1,6	0,2
Mn	5	1	ND	ND	24	1	4
Cu	1	5	2	5	8	5	9
Fe	10	207	43	266	207	95	71
* Solución Extractora: KCl-Olsen Modificado, ND: No Detectable.							

Discusión

Los suelos ubicados en las estribaciones de la Cordillera de Talamanca, tanto del Pacífico como del Atlántico, en San Carlos y en el sur del país; particularmente en el cantón Buenos Aires de Puntarenas, son de los más antiguos (Alvarado *et al.* 2014, Betrano 2017, Henríquez *et al.* 2017). Buenos Aires se caracteriza por ser una zona con suelos muy pobres de tipo sabana, con pendientes moderadas, erosionadas por el sobre pastoreo, la mala calidad de los pastos y las actividades agropecuarias (INDER 2014). Se sabe que el uso intensivo del suelo hace que se deterioren sus propiedades físicas y al mismo tiempo los vuelven más susceptibles a la erosión hídrica (Solano y Acuña 1993). Los perfiles Sabana La Pelona (P14), quebrada Palma (P18), Cacao (P19) y Las Juntas (P21) son ejemplos de lo anterior, al presentar horizontes superficiales delgados o evidencia de un horizonte superficial decapitado, cuando no se observa incremento en los contenidos de arcilla, en perfiles de suelo con horizontes arcillosos (Soil Survey Staff 2006b).

En términos generales y según las características morfológicas, físicas y químicas descritas anteriormente, los perfiles estudiados se pueden agrupar en tres órdenes de suelo; los Oxisoles y Ultisoles, son los más abundantes y se distribuyen en partes altas y partes bajas del área de estudio; y Entisoles, cuya distribución está asociada a los márgenes de los ríos de la zona, desde sus ápices hasta desembocar en el río General.

Características morfológicas

Oxisoles

Como mencionan (Mansyur *et al.* 2019), el estudio de la morfología del suelo es muy importante, ya que brinda una visión de los cambios y la evolución del suelo a través del tiempo. Más aún, cuando se trata de Oxisoles, que son los suelos más maduros y meteorizados de la taxonomía de suelos (Miller 2011). Los Oxisoles por lo general son suelos profundos y altamente meteorizados, dominados por minerales arcillosos de baja actividad (1:1) y óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio en proporciones variables, según el material parental y la intensidad de la meteorización que hayan sufrido (Schaefer *et al.* 2008). Sus colores están en función principalmente del contenido de hierro en el material parental, así como el tipo de minerales de hierro presentes, como goethita que produce colores

amarillentos y hematita de colores rojizos y la presencia de materia orgánica coloidal oscurece los colores de estos suelos (Beinroth *et al.* 1996). La goethita, se caracteriza mostrar por colores pardo amarillentos (2.5 Y-10 YR; en ausencia de hematita) y la hematita confiere colores rojizos (2.5 YR-5 R), incluso cuando está presente en cantidades pequeñas (Schaefer *et al.* 2008). Los Oxisoles pueden presentar distintos colores, aunque los tonos rojos, rojo-amarillentos y amarillos son los más comunes (Buol y Eswaran 1999). Los perfiles analizados muestran tonos de color en los rangos mencionados, lo que corresponde tanto al grado de meteorización de estos suelos, como a los minerales dominantes; por otra parte, como mencionan Camacho *et al.* (2021), los Oxisoles bien drenados generalmente tienen colores de rojos a marrón rojizos (10 R, 2.5 YR y 5 YR).

Al igual que Pragana *et al.* (2016) y Freitas *et al.* (1996), en esta investigación se encontraron Oxisoles en los que predominaron horizontes con estructura de bloques subangulares de tamaño medio, fino y muy fino (P1, P2, P3, P4, P6, P7, P9, P10, P11, P14, P16, P17, P18 y P19). Este tipo de estructura se ve favorecida por presencia de óxidos de hierro y aluminio y caolinita (Ghidin *et al.* 2006). En el caso particular del perfil Llano Bonito (P4) cuyo horizonte Ap presentó una estructura granular, Carducci *et al.* (2011) explican que esto es común en los Oxisoles de las sabanas brasileñas, debido a que están muy erosionados. Por otra parte, un rasgo característico en los Oxisoles son los elementos estructurales de grado muy débil, en los que el material colapsa y falla abruptamente cuando se presionan suavemente entre los dedos (Beinroth *et al.* 1996), pero esto no se reportó en los perfiles estudiados debido a sus altos contenidos de arcilla y densidad aparente. La estructura de bloques subangulares de grado moderado y fuerte en Oxisoles la describen Freitas *et al.* (1996) en sistemas de manejo convencional de labranza con arado de discos, degrada la estructura del suelo haciéndola más fuerte, pudiendo llegar a formar capas compactadas. La consistencia en Oxisoles está asociada a los contenidos de arcillas, por lo que la plasticidad y adherencia es variable, la resistencia a la rotura puede pasar por firme, dura, ligeramente dura hasta friable, esto depende del tipo y tiempo de labranza que ha recibido el suelo (Ferreira *et al.* 2010).

Ultisoles

Purwanto *et al.* (2020) describieron Ultisoles derivados de sedimentos de más de 120 cm de profundidad, con colores de matiz que varían de tonos 2.5 YR a 10 YR, y mencionan que el color de estos suelos está influenciado por la cantidad de contenido de materia orgánica, la lluvia y el grado de meteorización del material parental. Las horizontes superiores de los suelo de color marrón fuerte (7.5 YR), que cambian a rojo amarillento (5 YR) como en el caso del perfil Dúrika (P15), hasta rojo 2.5 YR que es indicativo de la presencia de hematita La Ceiba (P20) y Las Juntas (P21) de tonalidades más rojizas (Fatai *et al.* 2017). Los colores rojo pardusco representan la presencia de minerales ricos en óxidos de hierro, como goethita y hematita, con marrones más intensos que indican una mayor composición de goethita o más rojos intensos que indican mayores contenidos de hematita (Irmak *et al.* 2007).

Por otra parte, Fatai *et al.* (2017) y Zenero *et al.* (2016) estudiaron Ultisoles que presentaron estructura de bloques subangulares y considerables incrementos en los contenidos de arcilla, este tipo de estructura se asocia al cambio de uso de la tierra, al pasar de bosque a pasto, además de ciclos de humectación y secado del suelo durante largos periodos de tiempo. El carácter cohesivo y adherente son atributos característicos de los horizontes en los Ultisoles, que tienen una consistencia muy dura y extremadamente dura cuando están secos, y que se vuelven friables o firmes cuando están húmedos (Lima Neto *et al.* 2010).

Entisoles

Los Entisoles se distinguen por ser suelos superficiales que se forman en pendientes pronunciadas o zonas de deposición de materiales (Bazuki y Sheil 2005). Los perfiles descritos en esta investigación se situaron en las partes altas de los abanicos aluviales de Buenos Aires, cuyos materiales son transportados a las partes más bajas donde son depositados. Tienen horizontes A, colocados directamente sobre la roca o en horizontes CA, C o Cr y R, y varían en textura de arenosa a media como los estudiados por Santos *et al.* (2013). Ozsoy y Aksoy (2011) reportaron Entisoles con tonos de color en húmedo 10 YR, al igual que los tonos del perfil Santa María (P8) y los tonos de los horizontes subsuperficiales del perfil Ujarráz (P22), estos suelos son relativamente recientes y tienen restos de material parental o rocas en su matriz, lo que les confiere colores grisáceos. El perfil Ángel Arriba

(P5) mostró tonalidades pardo rojizas, que por tratarse de un Entisol con características ándicas (Vitrandic Udorthents), presenta tonos 5 YR y 7.5 YR, se asocian a Andisoles, como los descritos por Chinchilla *et al.* (2011).

En Entisoles jóvenes la estructura es variable, pero predominan estructuras débiles con pequeños agregados en bloques subangulares como el caso del Entisol El Ángel Arriba (P5) y Ujarrás (P22) (Poppiel *et al.* 2018). Otros, como el perfil de Santa María (P8), pueden presentar estructura granular por la influencia de materia orgánica descompuesta proveniente de la vegetación (Ramírez 2016). La consistencia en húmedo friable de los Entisoles, se relaciona con los contenidos de materia orgánica, al igual que clases texturales francas ligeramente adherentes y ligeramente plásticas (Voncir *et al.*, 2006).

Características físicas

Oxisoles

Como mencionan Camacho-Tamayo *et al.* (2010), desde el punto de vista físico los Oxisoles tienen una estructura estable y una densificación natural, por lo que son susceptibles de degradarse una vez que se altere la condición original del suelo. La densidad aparente (D. Ap) y la densidad de partículas (D. Part) de los perfiles estudiados, mostraron valores dentro de los rangos típicos para Oxisoles como los reportados por Molina *et al.* (2003). Esos valores son indicativos de procesos naturales de densificación (Phiri *et al.* 2001). Por el contrario, el perfil del Ángel (P6) presentó valores de D. Ap más bajos que los otros Oxisoles, este suelo tenía una cobertura de pasto, y se ubica en la parte alta del Abanico río Ángel, donde no se da un uso intensivo por sus fuertes pendientes, y están menos disturbados, lo que explica los valores de D. Ap por debajo de $0,9 \text{ g/cm}^3$ (Reichert *et al.* 2009), similar a lo que ocurre con los valores de D. Ap de los horizontes Ap de los perfiles San Juancito (P1), Volcán (P2), Sabana La Pelona (P14) y Alto Guadalajara (P16). Lo anterior se relaciona con la porosidad del suelo, al igual que en esta investigación, Neves *et al.* (2003) encontraron porcentajes de porosidad no mayores a 60 % en Oxisoles del Estado de Paraná, al sur de Brasil. El uso intensivo del suelo es el principal agente de degradación de los Oxisoles, causando erosión y compactación, aumentos en la D. Ap, provocando mayor resistencia a la penetración de las raíces, disminución en la porosidad y la permeabilidad al aire de estos suelos (Koolen 1994;

Beinroth *et al.* 1996). El perfil El Ángel (P6), y los horizontes Ap de los perfiles San Juancito (P1), Volcán (P2), Sabana La Pelona (P14) y Alto Guadalajara (P16), presentaron valores de porosidad mayores al 60 %, como resultado de un uso menos intensivo (Tavares Filho y Tessier 2010). La porosidad es resultado directo de la organización de minerales del suelo, puede considerarse uno de los mejores indicadores cuantitativos para revelar y evaluar el estado de degradación estructural de los suelos (Kilasara y Tessier 1991).

La reducción de la porosidad y particularmente la reducción de los poros de mayor diámetro, disminuyen la retención de agua a bajas tensiones, como ocurre en los perfiles de Oxisoles estudiados, donde no observaron grandes diferencias en el contenido de agua útil en las capas más profundas del suelo de un mismo perfil (Siqueira *et al.* 2014). Araujo-Junior *et al.* (2011) observaron mayor retención de agua en las capas superficiales que en horizontes más profundos, como ocurre en los perfiles El Ángel (P6), Convento (P9) y Buenos Aires (P10).

La textura en Oxisoles puede variar de franco arenosa a arcillosa (Beinroth *et al.* 1996). Tal y como se observó en los perfiles clasificados como Oxisoles, el horizonte Ap de San Juancito (P1), Llano Bonito (P4), el horizonte BC de Convento (P9), el Ap de río Cañas (P17), fueron de clase textural Franco arcillosa, el resto de horizontes fueron arcillosos con porcentajes de arcilla desde 30 hasta 75 % como los perfiles estudiados por Ferreira *et al.* (2010) y Prasetyo y Suharta (2004). Los bajos porcentajes de arena y limo indican un grado avanzado de meteorización del suelo, esencial para la clasificación de estos perfiles como Oxisoles (EMBRAPA 2006).

Ultisoles

Los valores de D. Ap de los horizontes Ap de Dúrika (P15), La Ceiba (P20) y Las Juntas (P21) fueron menores que los horizontes subyacentes, ya que en la superficie la presencia de materia orgánica contribuye a reducir la D. Ap, a aumentar los macroporos, promoviendo una mejor aireación, intercambio de gases y el flujo de agua (Bilibio *et al.* 2010). Como mencionan Alvarado y Forsythe (2005) es común que los valores de D. Ap aumenten de horizontes superficiales a horizontes inferiores cuando hay migración de arcilla, la cual se deposita sobre los agregados y reduce los espacios vacíos. La D. Part en Ultisoles suele variar

considerablemente dependiendo de los minerales que originaron los suelos, los valores oscilan entre 2,0 y 2,8 g/cm³, por lo que se puede asumir que en Ultisoles fuertemente meteorizados estudiados en esta investigación, domina la fracción mineral (Chinchilla *et al.* 2011). Los Ultisoles de forma similar a los Oxisoles, tienen una tendencia natural a densificarse, aunque en menor medida, por esta razón los valores de D. Ap son ligeramente menores a los Oxisoles estudiados. Las densidades aparentes menores, suelen tener mayor porosidad, lo que contribuye a la existencia de más sitios para la retención de moléculas de agua en la matriz del suelo y pueden almacenar más agua (Tuller 2005).

Los Ultisoles de los sitios estudiados presentaron una clase textural arcillosa, lo que concuerda con los descritos por Prasetyo y Suharta (2004). Los contenidos de arcilla tienden a incrementarse con la profundidad, lo cual es prueba del proceso de iluviación de arcilla para la formación de endopedones con altos contenidos de arcilla (Aditya *et al.* 2021).

Entisoles

La principal responsable de la variación en la D. Ap de Entisoles es la materia orgánica, que también es responsable de incrementos en el porcentaje de porosidad del suelo (Sumono *et al.* 2018). Los perfiles del Ángel Arriba (P5), Santa María (P8) y Ujarrás (P22) fueron los que presentaron los valores más bajos de D. Ap, así como porcentajes de porosidad mayores al 50 %, esto se relaciona directamente con los altos valores CO reportados para estos suelos. A pesar de esto, los perfiles presentaron los valores de D. Part de entre 2,0 y 2,5 g/cm³ que indican una fuerte influencia del material parental (Araújo Filho *et al.* 2021).

Los Entisoles se caracterizan por ser suelos poco profundos de hasta 50 cm y por presentar clases texturales de arenosas a francas (Benites *et al.* 2007), asociadas a depósitos aluviales o materiales producto de la meteorización del material parental (Ratke *et al.* 2020). Por lo general, retención de agua en Entisoles es más baja que otros suelos, ya que están dominados por materiales arenosos (Hong *et al.* 2013). Los valores de agua útil de estos Entisoles se encuentran entre los rangos bajos descritos por Ochoa *et al.* (2008) para texturas medias y texturas gruesas.

Características químicas

Oxisoles

El pH de los Oxisoles estudiados tendió a ser ácido, tanto en la capa superficial como en el subsuelo, como los perfiles estudiados por Kome *et al.* (2016) y Pragana *et al.* (2016), quienes explican que la acidez en suelos tropicales se debe principalmente al aluminio intercambiable más que a los iones hidronio (H^+). Este aluminio está presente en el material parental y es liberado al complejo de intercambio del suelo por los procesos de meteorización (Mansyur 2019). Los contenidos de carbono orgánico (CO) fueron altos, similares a los reportados por Kome *et al.* (2016) y Prasetyo y Suharta (2004). Lo suficientemente altos para que los perfiles San Juancito (P1), Volcán (P2), Llano Bonito (P4), El Ángel (P6), Guadalajara (P7), Convento (P9) y Cordoncillo (P11), se pudieran clasificar como Humic a nivel de subgrupo. Los valores de CO fueron mayores en los horizontes superiores que en los inferiores, con una tendencia a disminuir con la profundidad (EMBRAPA 2006). La materia orgánica es fundamental en los suelos tropicales, ya que contribuye a incrementar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Camacho-Tamayo *et al.* 2010). Aunque estos suelos fueron clasificados como Oxisoles, los contenidos de materia orgánica y CIC en sus horizontes superficiales les permiten sustentar la vegetación natural que presenten, pero en los horizontes más profundos los valores de CO y CIC disminuyen drásticamente.

Las bases intercambiables (Ca, Mg y K), porcentaje de saturación de bases (% SB) y CIC de los horizontes más profundos, fueron bajas, típico de suelos que han soportado largos e intensos periodos de meteorización y lixiviación (Camacho-Tamayo *et al.* 2010). Incluso fueron más bajas que las reportadas por Kome *et al.* (2016) y Egbuchua (2014) en Oxisoles de Camerún y Nigeria. Cabe destacar los perfiles San Juancito (P1), Volcán (P2), Peje (P3), El Ángel Arriba (P6) y Sabana La Pelona (P14), que mostraron contenidos de Ca, Mg y K, y porcentajes de % SB y CIC mayores, en comparación con los otros suelos considerados Oxisoles, lo que puede deberse a que estos suelos hayan recibido algún manejo agronómico asociado a los cultivos que soportan, como por ejemplo la aplicación de cal agrícola o la aplicación de emmiendas de materia organica (Pragana *et al.* 2016; Guedes *et al.* 2014).

Ultisoles

Los perfiles clasificados como Ultisoles mostraron pH ácidos, pero menos ácidos que los Oxisoles. Presentaron valores de pH en el rango de los Ultisoles estudiados por Rubiano (2005) y Jaimes *et al.* (2003), quienes también los asocian a los contenidos de aluminio intercambiable del material parental. Los perfiles Dúrika (P15), La Ceiba (P20) y Las Juntas (P21) pueden ser clasificados en el suborden de los Humults, Ultisoles bien drenados y con altos contenidos de CO (Chinchilla *et al.* 2011). El perfil Dúrika (P15) presentó porcentajes de CO mayores que el perfil La Ceiba (P20) y Las Juntas (P21), lo que se puede explicar por el tipo de uso del suelo, ya que el perfil Durika (P15) se encuentra en una zona de bosque secundario, donde recibe un considerable aporte de materia orgánica, en comparación de las fincas donde se encuentran estos perfiles La Ceiba (P20) y Las Juntas (P21); mayores porcentajes de CO, se asocian a valores altos de CIC, ya que la materia orgánica tiene papel importante en la capacidad de intercambio de cationes (Prasetyo *et al.* 2016), debido a esto el perfil Dúrika (P15) mostró buenos contenidos de bases. El Ca y Mg en el perfil La Ceiba (P20) fueron mayores que los contenidos de estos elementos en el perfil Las Juntas (P21), lo que puede deberse al efecto residual de encalados realizados en la finca (Pragana *et al.* 2016).

Entisoles

Los perfiles El Ángel Arriba (P5) y Santa María (P8), mostraron valores de pH inferiores a 5,4, por lo que son considerados como ácidos como los estudiados por Santos *et al.* (2018) y Chinchilla *et al.* (2011). Singh *et al.* (2017), explican que pH ácidos en suelos recientes se deben a los contenidos de aluminio presente en el material parental, el cual puede llegar a ser tóxico para las plantas y limitarla nutrición de otros nutrientes, lo contrario ocurre con el perfil Ujarrás, que aparte de presentar pH cercanos a 6, también presenta un buen porcentaje de saturación de bases. Los contenidos de CO fueron altos en los tres perfiles, como en los Entisoles estudiados por Poppiel *et al.* (2018). Sin embargo, no se observó la tendencia a disminuir con el incremento en la profundidad reportada por otros autores (Zúñiga *et al.* 2014). Esto suele ocurrir en Entisoles en los que han ocurrido diferentes eventos de deposición de materiales y sedimentos, lo que también puede causar variación en las propiedades físicas, químicas y mineralógicas dentro de un mismo perfil (Suswati *et al.* 2015), tal y como ocurre con el % SB y la CIC de estos tres perfiles. Los contenidos de Ca,

Mg y K son relativamente bajos en el perfil El Ángel Arriba (P5) y Santa María (P8), lo que puede deberse a materiales parentales pobres en bases intercambiables (Prasetyo & Suharta 2004; Chinchilla *et al.* 2011) y a la intensa lixiviación de cationes por frecuentes e intensas lluvias en que se ubican estos suelos (Freitas *et al.* 2013; Fatai *et al.* 2017).

Conclusiones

- La variabilidad intrínseca de los suelos se debe a factores edáficos y climáticos, influidos por procesos biológicos, físicos y químicos, que actúan simultáneamente con diferente intensidad y están asociados directamente a su génesis.
- Los Oxisoles y Ultisoles son los suelos dominantes en los abanicos aluviales antiguos de Buenos Aires de Puntarenas.
- El material parental de los que están formados, así como las condiciones climáticas y condiciones medio ambientales les confieren pH ácidos, baja fertilidad química y buenos contenidos de carbono orgánico.
- Desde el punto de vista físico, son suelos estables, de texturas arcillosas, que enfrentan procesos naturales de densificación que son acelerados por el uso intensivo de las actividades agrícolas.
- Los contenidos de carbono orgánico en los Oxisoles y Ultisoles, compensa en cierta medida la escasa fertilidad química que presentan, por lo que es muy importante conservar la materia orgánica poseen estos suelos.
- Conocer la clase de suelo, sus características, propiedades y uso actual, permiten crear una línea de base con el fin de desarrollar y establecer medidas correctivas de protección y conservación de los suelos en el área de estudio.

Literatura citada

Aditya, HF; Seca, G; Rayes, ML; Karam, DS. 2021. Toposequent Effect on Soil Morphology and Classification of Ultisol Soil in the Ayer Hitam Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *Jurnal Sylva Lestari*. Vol. 9 (2): 202-212 p.

Alvarado, A; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 29 (1): 85-94 p.

Alvarado, A; Mata, R; Chinchilla, M. 2014. Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931–2014: II. Mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxídico caolínificas. *Agronomía Costarricense*. 38 (1): 107-131 p.

Araujo Filho, RN; Holanda, F; Moacyr, F; Piscocoya, V; Neto, J; Guimarães, D. 2021. Relationship between physical and chemical properties of Entisols-Fluvents and erosion in the São Francisco River. *Revista Caatinga*. 34. 422-431 p.

Araujo-Junior, CF; Tácito Gontijo Guimarães, P; de Souza Dias Junior, M; Nunes Alcântara, E; Resende Mendes, AD. 2011. Alterações nos atributos químicos de um latossolo pelo manejo de plantas invasoras em cafeeiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35(6): 2207-2217 p.

Bazuki, I; Sheil, D. 2005. Local perspectives of forest landscapes: A preliminary evaluation of land and soils, and their importance in Malinau, East Kalimantan, Indonesia. Center for International Forestry Research (CIFOR).

Beinroth, FH; Eswaran, H; Palmieri, F; Reich, PF. 1996. Properties, Classification, and Management of Oxisols. Soil Management Collaborative Research Support Program. Washington, D. C, USA. 174 p.

Benites, V; Schaefer, C; Simas, F; Santos, H. 2007. Soils associated with rock outcrops in the Brazilian mountain ranges Mantiqueira and Espinhaço. *Brazilian Journal of Botany*.

- Bhattacharyya, T; Pal, DK. 2015. Soil. Science an introduction. 1 Ed. New Delhi. 39-56 p.
- Betrano, S. 2017. Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Evolución sobre la legislación sobre uso del suelo en Costa Rica (1949-2016). 472 p.
- Brevik, E; Cerdà, A; Mataix-Solera, J; Pereg, L; Quinton, J; Six, J; Oost, K. 2015. The interdisciplinary nature of Soil. SOIL. 1. 117–129 p.
- Brunelle, S. 2020. Appendix P: Guidance for Soil Collection, Characterization, and Application for Biothreat Agent Detection Method and Site Evaluations, *Journal of AOAC International*. Volume 103. Issue 4. July–August 2020. 873–881 p.
- Bilibio, WD; Corrêa, GF; Borges, EN. 2010. Atributos físicos e químicos de um Latossolo, sob diferentes sistemas de cultivo. Cienc Agrotec. 34: 817-22 p.
- Buol, SW; Eswaran, H. 1999. Oxisols. Adv. Agron. 68, 151-195 p.
- Camacho, ME; Mata, R; Barrantes-Viquez, M; Alvarado, A. 2021. Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. CATENA, 197, 104992.
- Camacho-Tamayo, JH; Luengas, CA; Leiva, FR. 2010. Evaluación de propiedades físicas de los oxisoles en la altillanura colombiana mediante análisis multivariado. Suelos Ecuatoriales. 40. (2): 170-175 p.
- Carducci, CE; de Olivera, GC; da Costa Siberiano, E; Marques Zeviani, W. 2011. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a Equação Duplo Van Genuchten. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 35, n. 1. 77-86 p.

Chinchilla, M; Alvarado, A; Mata, R. 2011. Factores formadores y distribución de suelos de la subcuenca del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 35 (1): 33-57. ISSN: 0377 – 9424.

Day, PR. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. *In* Black, CA. (Ed.). *Methods of soil analysis vol. 1*. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. 545–567 p.

Delgado, O; Carpio, C; Padilla, F; Ureña, F. 2011. Prospección Región del Diquís, Cantón de Buenos Aires. MIVAH – DVAH. 61 p.

Díaz-Romeu, R; Balerdi, F. 1967. Determinación de la Capacidad de Intercambio de Cationes del Suelo. IICA. Turrialba. Costa Rica. Modificado del método de Bower CA, *et al.*, 1952. Exchangeable cations analysis of saline and alkaline soils. *Soil Science*. 73: 251-261 p.

Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 61 p.

Egbuchua, CN. 2014. Hydraulic Conductivity Functions in Relation to Some Chemical Properties in a Cultivated Oxisols of a Humid Region, Delta State, Nigeria, *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 04, issue 04, number 198410, <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ags:ajosrd:198410>

Elementar Analysensysteme GmbH. 2009. CHNOS Elemental Analyzer vario macro cube. Operating Instructions. Hanau, Alemania. 667 p.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 2006. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. (2 Ed). Rio de Janeiro. 306 p.

Esayas, A; Debele, B. 2006. Soil survey in Ethiopia: past, present and future. In Proceedings of the 8th Conference, Soils for Sustainable Development. 1–10 p. Ethiopian Society of Soil Science, Addis Ababa, Ethiopia, April 2006.

Eswaran, H. 1977. Soil Analysis for Soil Surveys. In: Soil Resource Inventories. A proceedings of a workshop held at Cornell University, Ithaca, USA. 315-324 p.

Esu, IE. 1991. Detailed Soil Survey of NIHORT Farm at Bunkure, Kano State, Nigeria. Institute for Agricultural Research, Ahmadu Bello University, Zaria.

Fasina, AS; Omolayo, FA; Ajayi, SO; Falodun, AA. 2007. Influence of Land Use on Soil Properties in Three Mapping Units in Southwestern Nigeria-Implications for Sustainable Soil Management. In Uyovbisere, EO; Raji, BA; Yusuf, AA; Ogunwale, JO; Aliyu, L; Ojeniyi, SO. (Eds.). Soil and water management for poverty alleviation and sustainable Environment Proceedings of the 31st annual conf. of SSSN/ABU Zaria Nig. Nov. 13th to 17th, 2006.

Fatai, A; Shamshuddin, J; Fauziah, C; Othman, R; Bohluli, M. 2017. Formation and characteristics of an Ultisol in Peninsular Malaysia utilized for oil palm production. Solid Earth Discussions. 10.5194/se-2017-60 p.

Ferreira, CA; Silva, AC; Torrado, PV; Rocha WW. 2010. Genesis and classification of Oxisols in a highland toposequence of the upper Jequitinhonha Valley (MG). Revista Brasileira de Ciência do Solo. 34: 195-209 p.

Forsythe, W. 1985. Física de suelos. Manual de laboratorio. IICA, Costa Rica. 212 p.

Freitas, IC; Santos, FCV; Custódio Filho, RO; Correchel, V; Silva, RB. 2013. Agroecossistemas de produção familiar da Amazônia e seus impactos nos atributos do solo. Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.17: 1310-1317 p.

Freitas, PL; de Blancaneaux PH; Moreau, M. 1996. Caractérisation des sols des Cerrados Brésiliens (Savanes) dans le cadre de l'analyse morphostructurale. In: Réunion du Groupe Thématique "Structure et Fertilité des Sols Tropicaux". 3. ORSTOM, Montpellier. Compte Rendu. Montpellier: ORSTOM: 6-23 p.

Ghidin, AA; de Freitas Melo, V; Costa Lima, V; Costa Lima, JMJ. 2006. Oxisol toposequences developed from basaltic rocks in Paraná State, Brazil: II - relationship between clay fraction mineralogy and physical soil properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Vol. 30, no. 2. 307–319 p.

Guedes, E; Fernandes, A; Lobato, A; Guedes, R; Costa Netto, J; Moura, A; Marques, D; Ávila, F; Borgo, J. 2014. The chemical properties of a clayey Oxisol from Amazonia and the attributes of its phosphorus fractions. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 1212. 1328-1335 p.

Guhra, T; Stolze, K; Totsche, KU. 2021. The contribution of biogenic organic matter to aggregation in soil - a review, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-14927.

Henríquez, C; Cabalceta, G; Bertsch, F; Alvarado, A. 2017. Principales suelos de Costa Rica. Origen, características y manejo. Editado por la ACCS (Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo). San José, Costa Rica. 7 p.

Hong, SY; Minasny, Budiman, HK; Yihyun, K; Kyungdo, L. 2013. Predicting and mapping soil available water capacity in Korea. *PeerJ*. 1. e71. 10.7717/peerj.71.

IGN (Instituto Geográfico Nacional). 1980. Hoja cartográfica Buenos Aires 3543 IV. 3 Ed. San José, Costa Rica. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

INDER (Instituto de Desarrollo Rural). 2014. Región Brunca. Territorio Buenos Aires – Coto Brus. Informe de caracterización del territorio. San José, Costa Rica. 71 p.

Irmak, S; Surucu, A; Aydogdu, IH. 2007. Effects of Different Parent Material on the Mineral Characteristics of Soils in the Arid Region of Turkey. *Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS*. 10. 528-36 p.

Jaimes, W; Navas, G; Salamanca, C; Conde, A. 2003. Estudio detallado de suelos de la estación experimental de Corpoica Sabanas en la Altillanura colombiana. Corpoica, C. I. La Libertad, Villavicencio, Colombia. 62 p.

Jones, CG; Lawton, JH; Shachak, M. 1994. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* 69, 373-386 p. Wallwork, JA. (1970). *Ecology of Soil Animals*. (McGraw Hill, London).

Kilasara, M; Tessier, D. 1991. Intérêt des mesures physiques sur échantillons non remaniés dans la caractérisation des sols ferrallitiques. Application à la couverture ferrallitique du district de Muhesa (Tanzanie) *Cah. Orstom, sér. Pédol.* 26:91-103 p.

Kome, G; Oben, T; Enang, RK. 2016. Statistical Relationships and Variability of Selected Properties of Xanthic and Rhodic Ferralsols in a Humid Tropical Forest of Cameroon. *International Journal of Agriculture and Forestry*. 6. 187-195 p.

Lekwa, MU; Anene, BO; Lekwa, G. 2004. Chemical and Morphological Soil Characteristics in Drainage Toposequence in Southeastern Nigeria. In Ojeniyi, SO; Ano, AO; Awasalam, DO; Chukwu, GO. (Eds.). *Land Degradation, Agricultural Productivity and rural poverty, environmental implications proceedings of the 28th Annual Conference of the Soil Science Society of Nigeria, held at National Root Crops Research Institute, Umudike. Abiah State. Nov. 2003, 4th – 7th.*

L'Heureux, JS; Lunne, T. 2020. Characterization and engineering properties of natural soils used for geotesting [J]. *AIMS Geosciences*, 2020, 6 (1): 35-53 p.

Lima Neto, JA; Ribeiro, MR; Corrêa, MM; Souza-Júnior, VS; de Araújo Filho, JC; de Lima, JFWF. 2010. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos

de latossolos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(2), 473 p.

Mangi, J; Bijay-Singh, CM; Stirling, HS; Jagdish, J; Tetarwal, RK; Rajbir, S; López-Ridaura, S; Paresh SB. 2018. Chapter 4. Soil Processes and Wheat Cropping Under Emerging Climate Change Scenarios in South Asia. (Eds.). Donald L. Sparks, *Advances in Agronomy*. Academic Press. Volume 148. 111–171 p.

Mansyur, NI; Hanudin, E; Purwanto, BH; Utami, SNH. 2019. Morphological characteristics and classification of soils formed from acidic sedimentary rocks in North Kalimantan. *International Seminar and Congress of Indonesian Soil Science Society. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 393. 10 p.

Miller, W. 2011. *Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects*. (1 Ed.). Elsevier. Italy. 632 p.

Molina, DL; Amézquita, E; Hoyos, P. 2003. Construcción de capas arables en suelos Oxisoles de la Altillanura colombiana. En: Lobo Luján, D; Gabriels, D; Soto, G (Eds.). *Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo*. UNESCO. *Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo. Documentos Técnicos en Hidrología del PHI Serie n.71*. La Serena, Chile. 113-127 p.

Molina, E; Meléndez, G. 2002. *Tabla de interpretación de análisis de suelos*. Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), Universidad de Costa Rica (UCR).

Moral, JF; Rebollo, FJ. 2017. Characterization of soil fertility using the Rasch model. *Journal of soil science and plant nutrition*. 17 (2), 486–498 p.

Morris, M; Comeau, A; Ammons, J; Blair, R; Changsheng, L. 2010. A Comparison of Three Soil Characterization Methods on a Soil Formed in Sandy Glacial Outwash. *Proceedings of*

the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy. Volume 15. Article 28.

Neves, CS; Feller, C; Guimarães, MF; Medina, C; Filho, J; Fortier, M. 2003. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the Cropping Profile Method in clayey Oxisols in Brazil. *Soil and Tillage Research*. 71. 109-119 p.

Obando, LG; Kussmaul, S. 2009. Mapa geológico de la hoja Buenos Aires, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. 41: 2 p.

Ozsoy, G; Aksoy, E. 2011. Genesis and classification of Entisols in Mediterranean climate in Northwest of Turkey. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 9. 998-1004 p.

Phiri, S; Amézquita, E; Rao, IM; Singh, BR. 2001. Disc harrowing intensity and its impact on soil properties and plant growth of agropastoral systems in the Llanos of Colombia. *Soil Till. Res*. 62, 131-143 p.

Poppiel, RR; Lacerda MPC; Oliveira Junior, MP; Demattê, JAM; Romero, DJ; Sato, MV; Almeida Júnior, LR; Cassol LFM. 2018. Surface spectroscopy of Oxisols, Entisols and Inceptisol and relationships with selected soil properties. *Rev. Bras. Cienc. Solo*. 42:e0160519.

Pragana, R; Souza, JV; Moura, R; Soares, J. 2016. Characterization of yellow latosols (Oxisols) of Serra do Quilombo, in Piauí State Savanna Woodlands-Brazil. *Revista Caatinga*. 29. 832-840 p.

Prasetyo, BH; Suharta, N; Subagyo, H; Hikmat, H. 2016. Chemical and mineralogical properties of Ultisols of Sasamba area, east Kalimantan. *Indonesian Journal of Agricultural Science*. 7-47 p.

Prasetyo, BH; Suharta, N. 2004. Properties of low activity clay soils from South Kalimantan. Indonesian Journal of Agricultural Science. 2. 37-47 p.

Purwanto, S; Gani, RA; Suryani, E. 2020. Characteristics of Ultisols derived from basaltic andesite materials and their association with old volcanic landforms in Indonesia. Sains Tanah Journal of Soil Science and Agroclimatology, 17 (2): 135-143 p.

Ramírez, ER. 2016. Génesis, morfología, clasificación y susceptibilidad de suelos de la parte media de la Cuenca del río Abujao Región Ucayali. Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en Suelos. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.

Ratke, R; Alcinei Campos, R; Inda, RA; Barbosa, JR; Silva, Y; César, JN; Silva, JJ; Batista, S. 2020. Agricultural potential and soil use based on the pedogenetic properties of soils from the Cerrado-Caatinga transition Aptidão agrícola e uso do solo baseado nas propriedades pedogenéticas de solos da transição Cerrado-Caatinga. SEMINA: CIENCIAS AGRARIAS. 41. 1119-1134 p.

Reichert, JM; Suzuki, LEAS; Reinert, DJ; Horn, R; Håkansson, I. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. Soil and Tillage Research. 102 (2), 242-254 p.

Rubiano, Y. 2005. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad del suelo. Herramienta SIG para apoyo a la planificación, uso y manejo del suelo. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Palmira, Valle, Colombia. 35 p.

Santos, HG; Jacomine, PKT; Anjos, LHC; Oliveira, VA; Lumbrreras, JF; Coelho, MG; Almeida, JA; Araújo-Filho, J; Oliveira, JB; Cunha, T. 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos –SiBCS (5 Ed.). Rio de Janeiro: EMBRAPA.

Santos, RD; Lemos, RC; Santos, HG; Ker, JC; Anjos, LHC; Shimizu, SH. 2013. Manual de descrição e coleta de solos no campo (6 Ed.). Brazilian Society of Soil Science.

Schaefer, C; Fabris, J; Ker, J. 2008. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): A review. *Clay Minerals-CLAY MINER.* 43. 137-154 p.

Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. *Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0.* Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE. *Natl. Soil Surv. Ctr., Lincoln, NE* (September).

Singh, S; Tripathi, DK; Singh, S; Sharma, S; Dubey, NK; Chauhan, DK; Vaculík, M. 2017. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 177-193 p.

Siqueira, R; Ferreira, M; Alcântara, E; Silva, B; Silva, R. 2014. Water retention and S index of an Oxisol subjected to weed control methods in a coffee crop. *Ciência e Agrotecnologia.* 38. 471-479 p.

Soil Survey Laboratory Methods Manual. 2006a. SSIR No. 42. *USDA Natural Resources Conservation Service.* U. S. Govt. Printing Office, Washington, D. C, USA.

Soil Survey Staff. 2006b. *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys.* (20 Ed.). Washington, D. C, USA. 341 p.

Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys.* USDA-NRCS Agriculture Handbook No. 436, 2nd ed. US Government Printing Office, Washington D. C.

Soil Survey Staff. 1993. *Soil Survey Manual.* USDA Handbook No. 18, US Government Printing Office, Washington, D. C.

Solano, F; Acuña, R. 1993. Estudio de erosión hídrica y evaluación de prácticas de conservación de suelos bajo cultivo de piña (*Ananas comosus*) Buenos Aires, Puntarenas. Departamento de Geografía. Universidad de Costa Rica. 140 p.

Solano, J; Villalobos, G. 2001. Aspectos fisiográficos básicos para las principales regiones de Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. 15 p.

Sumono, L; Puspita, P; Nasution, D. 2018. Revamping of Entisol soil physical characteristics with compost treatment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Suswati, D; Sagiman, S; Udin, S. 2015. Effect of coastal sediment to nutrient availability and maize productivity on Entisols. AGRIVITA Journal of Agricultural Science. 37. 10.17503/agrivita.v37i3.460.

Tavares Filho, J; Tessier, D. 2010. Effects of different management systems on porosity of Oxisols in Paraná, Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34. 899-906 p.

Tuller, M. 2005. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents. Water Resources Research. 41:1-6 p.

USDA. 2012. Soil survey laboratory primary characterization, data of some Costa Rican soils. *Internal Report*. Lincoln, Nebraska. sp.

Voncir, N; Kparmwang, T; Amba AA; Hassan, AM. 2006. Variation in Morphological Properties and Particle Size Distribution of Alfisols, Inceptisols and Entisols in the Gubi Soil Series, Bauchi, Nigeria. Journal of Applied Sciences. 6 p.

Yitbarek, T; Beyene, S; Tsehai, K. 2016. Characterization and Classification of Soils of Abobo Area, Western Ethiopia. Applied and Environmental Soil Science. 2016. 1-16 p.

Zenero, M; Simões da Silva, LF; de Pierri Castilho, SC; Vidal, A; Grimaldi, M; Cooper, M. 2016. Characterization and Classification of Soils under Forest and Pasture in an Agroextractivist Project in Eastern Amazonia. Revista Brasileira de Ciência do Solo. (40). 1-17 p.

Zhang, YY; Wu, W; Liu, H. 2019. Factors affecting variations of soil pH in different horizons in hilly regions. *PloS one*, 14(6), e0218563.

Zúñiga, FD; Valle, SR; Dörner, J; MacDonald, R. 2014. Estabilidad estructural de un Andisol (Typic Durudand) bajo bosque nativo y pradera en el Sur de Chile. *Agro Sur* 42: 55- 66 p.

CAPÍTULO 3. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA A NIVEL DE SUBGRUPO DE LOS SUELOS ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES ANTIGUOS EN BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA.

Introducción

Los suelos han sido de interés para los humanos desde tiempos prehistóricos, y si bien los estudios de los suelos comenzaron dentro del contexto de otras ciencias, los estudios científicos y sistemáticos de los suelos, propiamente como la ciencia del suelo, comenzaron en el siglo XIX, con el objetivo de mejorar la producción de agricultura (Churchman 2010).

Los suelos se forman por las interacciones entre las diversas capas de la Tierra (atmósfera, biosfera, litosfera, hidrosfera); debido a esto su variabilidad en un área o región específica, está determinada por las condiciones y elementos con los que se forman (Mikhailova *et al*, 2021). El suelo es un cuerpo natural complejo y dinámico, resultado de procesos pedogenéticos durante y después de la meteorización de las rocas; consta de constituyentes minerales y orgánicos, que les confieren propiedades físicas, químicas, mineralógicas y biológicas definidas (Mondal 2021). Comprendiendo esto, entre las décadas de 1870 y 1880, científicos rusos bajo la dirección de Vasili Dokuchaev (1846-1903) idearon una ciencia innovadora para estudiar los suelos de forma independiente, partiendo del trabajo de campo en estepas, donde mapearon grandes grupos de suelos en áreas extensas, y con el principio de que esta idea podría aplicarse en todo el mundo, en 1899 el gobierno de los Estados Unidos de Norte América, bajo la dirección de Milton Whitney, se impulsó la comprensión física y geológica de los suelos (Moon 2020).

En el siglo XX, la Edafología como ciencia del suelo fue más allá de sus raíces agrícolas y la información del suelo, al ser tomada en cuenta en el desarrollo residencial, la planificación de carreteras, cimientos de edificios, los sistemas sépticos, manejo de la vida silvestre, manejo ambiental y muchas otras aplicaciones (Brevik 2010). La pedología, como subdisciplina de la ciencia del suelo, consiste en un cuerpo aceptado de leyes y teorías que cubren una variedad de ideas y conceptos relacionados con respecto a la definición del suelo como lo son horizontes, perfiles y pedones; los factores formadores; procesos pedogenéticos;

geografía y mapeo de suelos, relaciones suelo-paisaje y la clasificación de suelos (Bockheim *et al.* 2005).

El suelo, al ser considerado un cuerpo independiente con una organización morfológica definida, resultante de procesos pedogenéticos determinados y dirigidos por factores ambientales, llevó a los científicos a adoptar un enfoque genético para el estudio, caracterización y clasificación de la diversidad de suelos existentes alrededor del mundo, partiendo de sistemas de clasificación de suelos rusos, que tomaban en cuenta procesos de pedogénesis, que con los años han surgido diferentes sistemas de clasificación que buscan estandarizar aspectos como la nomenclatura del suelo y mejorar los métodos de diagnóstico, reconocimiento y descripción de los suelos, hasta poder llegar a considerarlos como unidades taxonómicas básicas (Williamson 1959).

Según Mill (1925), clasificar fenómenos naturales permite organizar conocimientos, destacar y entender las relaciones entre individuos y clases de una población clasificada, recordar propiedades de los objetos clasificados, aprender nuevas relaciones y nuevos principios en la población clasificada, establecer grupos o subdivisiones de los objetos estudiados; todo esto con el propósito de predecir su comportamiento, identificar sus mejores usos, estimar su productividad y proporcionar objetos o unidades de investigación, así como extender y extrapolar resultados de investigaciones u observaciones.

La taxonomía de suelos es un sistema básico de clasificación que ayuda a clasificar los suelos en distintas clases, agrupados en función de sus características comunes, sus propiedades, y fertilidad, resultado de procesos pedogenéticos similares (Balasubramanian 2017). Esto implica la identificación y formulación de los principios de clasificación; tratamiento científico del sistema jerárquico de unidades taxonómicas; desarrollo de la nomenclatura de suelos; e identificación de las características utilizadas para diagnosticar y mapear los suelos de todos los subconjuntos de clasificación (Matchavariani 2019). Existen diferentes sistemas de clasificación taxonómica de suelos, por ejemplo, el Sistema Húngaro de Clasificación de Suelos, un sistema de clasificación genética y jerárquica, el cual continúa la tradición de Dokuchaev para nombrar clases, este sistema fue desarrollado en la década de 1960 (Szabolcs

1966) y se actualizó en 1989 (Jassó *et al.* 1989), tiene cuatro niveles de clasificación, como tipo principal, tipo, subtipo, variedad. La Base Mundial de Referencia para el Recurso Suelo (WRB) que se desarrolló a partir del Mapa Mundial de Suelos FAO-UNESCO (FAO-UNESCO 1974), este sistema no emplea una jerarquía para los grupos de suelos de referencia, pero tiene varios niveles jerárquicos y utiliza horizontes y características de diagnóstico en una clave, su uso es promovido por la FAO como una “clasificación internacional” y es la clasificación más utilizada en la Unión Europea (Tóth *et al.* 2008). Entre los más utilizados en el mundo, y el utilizado en Costa Rica esta la taxonomía de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)-Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), que establece un sistema de clasificación jerárquico que utiliza horizontes diagnósticos y rasgos clave organizados en seis niveles como lo son orden, suborden, gran grupo, subgrupo, familia y serie (Soil Survey Staff 2022).

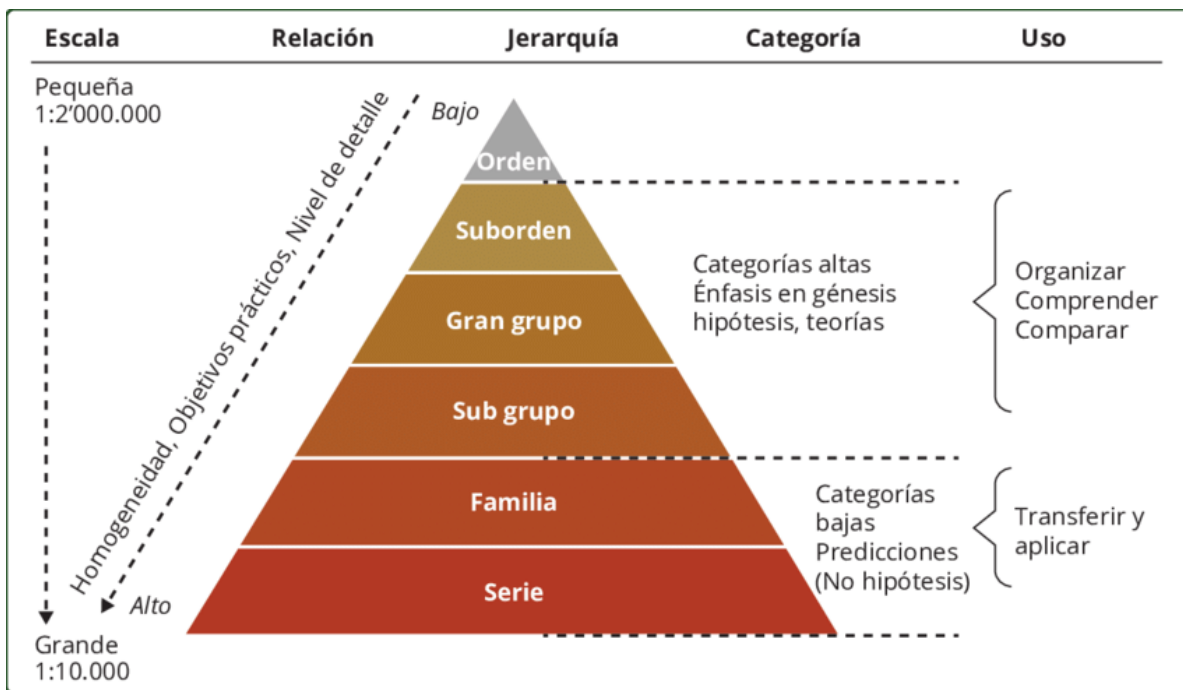


Figura 3.1. Sistema jerárquico de la taxonomía de suelos del USDA (IGAC 2015).

Una de las principales diferencias entre el sistema de clasificación norteamericano y otros sistemas de clasificación, radica en la definición de los taxones, los cuales sirven para seleccionar características que diferencian los suelos, como por ejemplo temperatura y la

humedad; y que tampoco se utiliza la génesis como un aspecto de distinción, excepto como guía para determinar la pertinencia y denotar propiedades específicas de los suelos (Smith 1968).

En el sistema de clasificación de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), se parte del nivel categórico más alto, abarcando toda la población de suelos, agrupándolos en los órdenes de suelos; posteriormente, se toman en consideración las propiedades y la naturaleza de los suelos de un orden dado, para determinar el suborden. Las características de diferenciación para los subórdenes son las mismas dentro de los grandes grupos y dentro del suborden, pero estas características de diferenciación no se aplican uniformemente, ni son aplicables a todos los suelos de un nivel categórico determinado, por lo que es muy importante seguir la clave de clasificación de suelos, siguiendo su orden jerárquico desde el principio, con el fin de evitar confusiones y errores al clasificar taxonómicamente los suelos (Buol *et al.* 1990).

El objetivo de este apartado es clasificar taxonómicamente hasta nivel de subgrupo según la taxonomía de suelos del USDA, los 22 perfiles de suelos descritos y caracterizados en esta investigación, los cuales se ubican en diferentes secciones del mapa geológico de la Hoja Buenos Aires, realizado por Obando y Kussmaul (2009).

Metodología

Área de estudio

En este capítulo se clasificaron 22 perfiles de suelo distribuidos en los distritos Volcán, Brunka y Buenos Aires del cantón del mismo nombre y parte del distrito San Pedro de Pérez Zeledón. Esta zona presenta una estación seca que inicia a finales de diciembre y termina alrededor de abril, siendo febrero el mes más seco, y octubre el mes más lluvioso (INDER 2014). Como material parental se destacan tres formaciones de origen sedimentario (Abanicos aluviales, Formación Valle del General y Formación Curré) y dos formaciones de origen ígneo (grupo intrusivo Talamanca y vulcanismo post-intrusivo) (Ulloa y Delgado 2010). La topografía en las partes altas se caracteriza por presentar cimas agudas con vertientes heterogéneas; en las partes medias, por la presencia de valles intermontanos, y su inclinación disminuye conforme se desciende hacia las partes bajas donde convergen los abanicos aluviales (Delgado *et al.* 2011). Según Obando y Kussmaul (2009), estos abanicos datan de hace unos 12 000 años.

Trabajo de campo

La ubicación de los perfiles se determinó mediante el análisis de una serie de observaciones denominadas barrenadas simples o cateos de suelos, realizadas con un barreno tipo Edelman holandés, considerando los distintos paisajes dentro de los abanicos aluviales y materiales parentales descritos por Obando y Kussmaul (2009) en el mapa geológico de la hoja Buenos Aires. Para la descripción detallada de los perfiles de suelos se realizaron calicatas, las cuales son fosas de observación de 1,5 m de ancho por 2,0 m de largo y 2,0 m de profundidad o hasta la profundidad que permita el suelo. Se identificaron los horizontes, se midió su espesor, profundidad, color en húmedo y en seco con una Tabla Munsell, estructura, consistencia, presencia de formaciones especiales y demás parámetros descritos por Schoeneberger *et al.* (2012). Además, se tomaron muestras para determinar diferentes parámetros de características físicas y químicas de cada uno de ellos, que son requeridas para realizar la clasificación taxonómica a nivel de subgrupo de los perfiles estudiados, como la clase textural, porcentaje de saturación de bases, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables en acetato de amonio, relación CIC por kg de arcilla, pH en agua, pH en KCl y carbono orgánico.

Métodos de laboratorio para análisis de características físicas y químicas de suelo requeridas para la clasificación taxonómica a nivel de subgrupo

Características físicas

Textura: Se determinó por el método de Bouyoucos modificado por Day (1965), en el que se pesaron 40 g de suelo que fue secado al aire entre 26 y 29°C y tamizado a 2 mm y se colocaron en una botella con 100 ml de agua y 50 ml de una solución de Calgón (hexametáfosfato de sodio + carbonato de sodio) y se pusieron en agitación por 16 horas. El contenido de la botella se trasvasó a una probeta de precipitación de 1000 ml y se aforó, se agitó el contenido y se realizó una lectura con un hidrómetro a los 40 segundos y otra lectura a las 2 horas (Forsythe 1985). Con estas lecturas se obtuvieron los porcentajes de arena, limo y arcillas y se definió la clase textural según el USDA (2012).

Características químicas

pH en agua: Consiste en la determinación de la cantidad de iones hidronio en disolución de suelo. Se trabajó con una relación suelo: agua 1:1 utilizando un medidor de pH (Soil Survey Staff 2006b).

pH en KCl 1 N: Consiste en la determinación de la cantidad de iones hidronio en disolución de suelo. Se trabajó con una relación suelo: KCl 1:1 utilizando un medidor de pH (Soil Survey Staff 2006).

Carbono orgánico: Se realizó con un autoanalizador por el método de combustión seca de Dumas (Elementar Analysensysteme GmbH 2009).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases (Ca, Mg, K y Na): Se extrajeron empleando acetato de 1 N a pH 7. Las bases se analizaron por absorción atómica y la CIC por el Analizador de Inyección de Flujo (FIA) (Díaz-Romeu y Balerdi 1967).

Clasificación taxonómica

Con los datos de los análisis de laboratorio, tanto físicos como químicos y otras características morfológicas de los perfiles (paisaje y pedón), se utilizó la Clave para la

Taxonomía de Suelos en su décimo tercera edición del año 2022, partiendo de la definición de los horizontes diagnóstico, para con ellos establecer el orden y siguiendo los criterios y parámetros establecidos en la taxonomía, para continuar con la definición del suborden, el gran grupo y el subgrupo (Soil Survey Staff 2022).

Resultados

Criterios de clasificación taxonómica: Definición de epipedón, endopedón y características diagnósticas

San Juancito (P1)

Epipedón: Ócrico, tiene 25 cm de espesor, pero no presentó una saturación de bases de 50 % o más, por lo que no puede ser mólico, ni presentó colores dominantes con value de 3 o menos, en húmedo, y de 5 o menos, en seco; ni colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que tampoco puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt1 cumple con el espesor mínimo de 18 cm y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que en el horizonte superficial, si el horizonte tiene más de 40 % de arcilla total en la fracción de tierra-fina, a una profundidad dentro de los 100 cm a partir de la superficie del suelo mineral, ya que el contenido de arcilla en la fracción de tierra-fina del horizonte superficial es de más de 20 %. Un espesor de más de 30 cm. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Volcán (P2)

Epipedón: Ócrico, ya que, cumple con el espesor mínimo de epipedón, pero no presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico, y tampoco presentó colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que no puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, el horizonte Bt1 cumple con el espesor mínimo de 18 cm y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que en el horizonte superficial, si el horizonte tiene más de 40 % de arcilla total en la fracción de tierra-fina, a una profundidad dentro de los 100 cm a partir de la superficie del suelo mineral, ya que el contenido de arcilla en la fracción de tierra-fina del horizonte superficial es de más de 20 %. Presentó un espesor de más de 30 cm. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Peje (P3)

Epipedón: Ócrico, tiene 24 cm de espesor, pero no presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico, tampoco presentó colores dominantes con value de 3 o menos, en húmedo; ni colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que no es un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt1 cumple con el espesor mínimo de 18 cm y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que, en el horizonte superficial, si el horizonte tiene más de 40 % de arcilla total en la fracción de tierra-fina, a una profundidad dentro de los 100 cm a partir de la superficie del suelo mineral. Un espesor de más de 30 cm. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Características diagnósticas: Presencia de inicios de formación de plintita a una profundidad de 155 cm.

Llano Bonito (P4)

Epipedón: Ócrico, ya que no reúne los requisitos mínimos de espesor de los demás epipedones.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt cumple con el espesor mínimo de 18 cm y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que en el horizonte superficial, si el horizonte tiene más de 40 % de arcilla total en la fracción de tierra-fina, a una profundidad dentro de los 100 cm a partir de la superficie del suelo mineral, ya que el contenido de arcilla en la fracción de tierra-fina del horizonte superficial es de más de 20 %. Tiene un espesor de más de 30 cm. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

El Ángel Arriba (P5)

Epipedón: Ócrico, ya que no presentó el mínimo de espesor de los demás epipedones.

Endopedón: No presenta endopedón.

Características diagnósticas: Propiedades ándicas: presencia de alófanos (pruebas positivas al NaF), más de 30 % de la fracción de tierra-fina es de un tamaño entre 0,02 y 2,0 mm, retención de fosfatos de más de 25 %, Al + ½ Fe (por oxalato de amonio) mayor a 0,4 %, más de 5 % de vidrio volcánico y [(El contenido de Al + ½ Fe, en porcentaje) por (15,625)] + [contenido de vidrio volcánico, en porcentaje] de más de 36,25.

El Ángel (P6)

Epipedón: Ócrico, no cumplió con el mínimo de espesor de los demás epipedones, ni presentó una saturación de bases de 50 % o más, por lo que no puede ser mólico, y tampoco presentó colores dominantes con value de 3 o menos, en húmedo; ni colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que no puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt2 cumple con el espesor mínimo de 18 cm y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que en el horizonte superficial, si el horizonte tiene más de 40 % de arcilla total en la fracción de tierra-fina. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Guadalajara (P7)

Epipedón: Ócrico, ya que no cumplió con el mínimo de espesor, tampoco presentó una saturación de bases de 50 % o más, por lo que no puede ser mólico, ni presentó colores dominantes con value de 3 o menos, en húmedo; ni colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que no puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt1 cumple con el espesor mínimo de 18 cm y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que en el horizonte superficial, si el horizonte tiene más de 40 % de arcilla total en la fracción de tierra-fina, a una profundidad dentro de los 100 cm a partir de la superficie del suelo mineral, ya que el contenido de arcilla en la fracción de tierra-fina del horizonte superficial es de más de 20 %. Un espesor de más de 30 cm. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Santa María (P8)

Epipedón: Ócrico ya que, cumplió con el mínimo de espesor, pero no presentó una saturación de bases de 50 % o más, por lo que no puede ser mólico; ni presentó colores dominantes con un chroma de 5 o menos, en seco, por lo que no puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: No presenta endopedón.

Convento (P9)

Epipedón: Ócrico, reúne los requisitos mínimos de espesor, no presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico; ni presentó colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que no puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt2 cumple con el espesor mínimo de 18 cm y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. El horizonte tiene más de 40 % de arcilla total en la fracción de tierra-fina, a una profundidad dentro de los 100 cm a partir de la superficie del suelo mineral. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Buenos Aires (P10)

Epipedón: Ócrico ya que, no cumplió con el mínimo de espesor, ni presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico, ni presentó colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que no puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt1 cumple con el espesor mínimo y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que en el horizonte superficial. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente

de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Cordoncillo (P11)

Epipedón: Ócrico, a pesar que reúne los requisitos mínimos de espesor, pero no presentó una saturación de bases de 50 % o más, por lo que no puede ser mólico, ni presentó colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que tampoco puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt2 cumple con el espesor mínimo y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que, en el horizonte superficial, ya que tiene más de 40 % de arcilla total en la fracción de tierra-fina, a una profundidad dentro de los 100 cm a partir de la superficie del suelo mineral. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Río Azul (P12)

Epipedón: Ócrico ya que no cumple con el mínimo de espesor, no presentó una saturación de bases de 50 % o más, por lo que no puede ser mólico, tampoco mostró colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que no puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt1 cumple con el espesor mínimo y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto). Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Puente (P13)

Epipedón: Ócrico ya que no cumple con el mínimo de espesor, no presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico, ni presentó colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que no puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt1 cumple con el espesor mínimo y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto). Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Sabana La Pelona (P14)

Epipedón: Ócrico, no cumple con el requisito mínimo de espesor, ni presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico, ni presentó colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que tampoco puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt1 cumple con el espesor mínimo y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que en el horizonte superficial (en este caso se considera que el perfil ha sufrido un proceso de pérdida del horizonte superficial). Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Dúrika (P15)

Epipedón: Úmbrico, ya que presentó una clase de resistencia a la ruptura de suave o moderadamente dura; colores dominantes con un value de 3 o menos, en húmedo, y de 5 o menos, en seco; y colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo; y una saturación de bases en acetato de amonio menor de 50 %; y un contenido de carbono orgánico de 0,6 % o más; tienen un espesor mínimo de 18 cm y no presenta artefactos, ni marcas de pala, ni superficies elevadas que son características de un epipedón plaggen.

Endopedón: Argílico, ya que horizonte Bt1 satisface los criterios para las clases de tamaño de partícula francosa-gruesa, francosa-fina, limosa-gruesa, limosa-fina, fina o muy fina o es francosa o arcillosa, y posee más de 7,5 cm de espesor; mostró evidencias de iluviación de arcilla (películas de arcilla sobre la superficie de los agregados); conserva el horizonte eluvial y no existe una discontinuidad litológica entre él y el horizonte iluvial y no hay una capa arable directamente encima de la capa iluvial, entonces, el horizonte iluvial deberá contener más arcilla total que el horizonte eluvial dentro de una distancia vertical de 30 cm o menos (si el horizonte eluvial tiene 40 % o más de arcilla total en la fracción de tierra-fina, el horizonte argílico deberá contener al menos 8 % (absoluto) más arcilla.

Alto Guadalajara (P16)

Epipedón: Ócrico ya que, reúne los requisitos mínimos de espesor, pero no presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico, no presentó colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que tampoco puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte 2Bt1 cumple con el espesor y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que en el horizonte superficial. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Características diagnósticas: Línea horizontal de fragmentos rocosos entre los 18 y 40 cm de profundidad (línea de piedra).

Río Cañas (P17)

Epipedón: Ócrico, ya que no cumple con el espesor mínimo para ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt1 cumple con el espesor y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que en el horizonte superficial. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Quebrada Palma (P18)

Epipedón: Ócrico, reúne los requisitos mínimos de espesor, pero no presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico, y tampoco presentó colores dominantes con value de 3 o menos, en húmedo; ni colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que no puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt1 cumple con el espesor y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad dentro de una distancia vertical de 15 cm o menos, en un 8 % o más alto (absoluto) que, en el horizonte superficial, si el horizonte tiene más de 40 % de arcilla total en la fracción de tierra-fina, a una profundidad dentro de los 100 cm a partir de la superficie del suelo mineral. Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. Una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

Cacao (P19)

Epipedón: Ócrico, reúne los requisitos mínimos de espesor, no presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico, ni presentó colores dominantes con un chroma de 5 o menos, en seco, por lo que tampoco puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Kándico, ya que el horizonte Bt cumple con el espesor, y se encuentra dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Tiene su límite superior en el punto donde el porcentaje de arcilla de la fracción de tierra-fina se incrementa con la profundidad, ya que el horizonte tiene más de 40 % de arcilla total en la fracción de tierra-fina, a una profundidad dentro de los 100 cm a partir de la superficie del suelo mineral, ya que el contenido de arcilla en la fracción de tierra-fina del horizonte superficial es de más de 20 % (en este caso se considera que el perfil ha sufrido un proceso de pérdida del horizonte superficial). Una clase textural arena francosa muy fina o más fina. El mismo horizonte tiene una CIC aparente de 16 cmol(+)/kg de arcilla o menos (en acetato de amonio) y una CICE aparente de 12 cmol(+)/kg de arcilla o menos en 50 % o más de su espesor. Y el contenido de carbono orgánico tiene un decrecimiento regular con el incremento de la profundidad.

La Ceiba (P20)

Epipedón: Ócrico, no cumple con el espesor mínimo de los demás epipedones, tampoco presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico, ni un epipedón úmbrico.

Endopedón: Argílico, ya que el horizonte Bt1 satisface los criterios para las clases de tamaño de partícula francosa-gruesa, francosa-fina, limosa-gruesa, limosa-fina, fina o muy fina o es francosa o arcillosa, y posee más de 7,5 cm de espesor; mostró evidencias de iluviación de arcilla (películas de arcilla sobre la superficie de los agregados); conserva el horizonte eluvial y no existe una discontinuidad litológica entre él y el horizonte iluvial y no hay una capa arable directamente encima de la capa iluvial, entonces, el horizonte iluvial deberá contener más arcilla total que el horizonte eluvial dentro de una distancia vertical de 30 cm o menos (si el horizonte eluvial tiene 40 % o más de arcilla total en la fracción de tierra-fina, el horizonte argílico deberá contener al menos 8 % (absoluto) más arcilla).

Las Juntas (P21)

Epipedón: Ócrico, no cumple con el mínimo de espesor, tampoco presentó una saturación de bases de 50 % o más en todo su espesor, por lo que no puede ser mólico, ni presentó colores dominantes con value de 3 o menos, en húmedo; ni colores dominantes con un chroma de 3 o menos, en húmedo, por lo que no puede ser un epipedón úmbrico.

Endopedón: Argílico, ya que el horizonte Bt1 satisface los criterios para las clases de tamaño de partícula francosa-gruesa, francosa-fina, limosa-gruesa, limosa-fina, fina o muy fina o es francosa o arcillosa, y posee más de 7,5 cm de espesor; mostró evidencias de iluviación de arcilla (películas de arcilla sobre la superficie de los agregados); conserva el horizonte eluvial y no existe una discontinuidad litológica entre él y el horizonte iluvial y no hay una capa arable directamente encima de la capa iluvial, entonces, el horizonte iluvial deberá contener más arcilla total que el horizonte eluvial dentro de una distancia vertical de 30 cm o menos (si el horizonte eluvial tiene 40 % o más de arcilla total en la fracción de tierra-fina, el horizonte argílico deberá contener al menos 8 % (absoluto) más arcilla) (en este caso se considera que el perfil ha sufrido un proceso de pérdida del horizonte superficial por erosión).

Ujarrás (P22)

Epipedón: Ócrico, cumplió con el mínimo de espesor, no presentó una saturación de bases de 50 % o más, por lo que no puede ser mólico; y por la ubicación de perfil, alguna parte del epipedón está húmeda por 90 días o más (acumulativos), por lo que no es un epipedón úmbrico.

Endopedón: No presenta endopedón.

Características diagnósticas: El porcentaje de fragmentos rocosos decrece con el incremento de la profundidad entre la superficie del suelo y a 200 cm de profundidad.

Criterios de clasificación taxonómica: Definición de orden.

Otros suelos que tienen 40 % o más de arcilla en la fracción de tierra-fina entre la superficie del suelo mineral y a una profundidad de 18 cm (después de mezclados); y un horizonte kándico que tiene las propiedades de minerales intemperizables de un horizonte óxico (esto se desarrollará en el siguiente capítulo) y tiene su límite superior dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral: **Oxisoles**.

Los perfiles de San Juancito (P1), Volcán (P2), Peje (P3), Llano Bonito (P4), El Ángel (P6), Guadalajara (P7), Convento (P9), Buenos Aires (P10), Cordoncillo (P11), río Azul (P12), Puente (P13), Sabana La Pelona (P14), Alto Guadalajara (P16), río Cañas (P17), quebrada Palma (P18) y Cacao (P19) cumplen con estos criterios, por lo que se clasifican como Oxisoles a nivel de orden.

Otros suelos que tienen un horizonte argílico o kándico, pero no un fragipán y una saturación de bases de menos de 35 %, por el método de extracción de suma de cationes, a 80 cm abajo de la superficie del suelo mineral; un horizonte argílico o un kándico encima, dentro o abajo de él o películas arcillosas de 1 mm o más de espesor en uno o más de sus subhorizontes; y una saturación de bases de menos de 35 %, por el método de extracción de suma de cationes, a 200 cm abajo de la superficie del suelo mineral: **Ultisoles**. Los perfiles de Dúrika (P15), La Ceiba (P20) y Las Juntas (P21) corresponden a suelos dentro del orden de los Ultisoles, con un endopedón argílico.

Finalmente, los suelos que no cumplen con los criterios de clasificación de todos los órdenes anteriores: **Entisoles**. En este caso, los pedones de El Ángel Arriba (P5), Santa María (P8) y Ujarrás (P22), se clasifican como Entisoles.

Criterios de clasificación taxonómica: Definición de suborden.

En el orden de los Oxisoles, todos los perfiles se clasifican en el suborden **Ustox**, ya que el área de estudio presenta más de 90 días acumulativos en años normales, donde el suelo permanece seco.

Todos los perfiles clasificados como Ultisoles, cumplen con el criterio de 0,9 % o más de carbono orgánico en los 15 cm superiores del horizonte argílico, y además, cumplen con el criterio de 12 kg/m² o más de carbono orgánico entre la superficie del suelo mineral y una profundidad de 100 cm por lo que pertenecen al suborden de los **Humults**.

En el caso de los Entisoles, los perfiles de El Ángel Arriba (P5) y Santa María (P8) y Ujarrás (P22), no cumplen con los criterios de los diferentes subgrupos de los Entisoles mencionados

antes de los Fluvents, ni los Fluvents como tales, por lo que se clasifican en el suborden de los **Orthents**.

Criterios de clasificación taxonómica: Definición de gran grupo.

Los perfiles de Guadalajara (P7), Convento (P9) y río Cañas (P17) son Oxisoles del subgrupo de Ustox que tienen, mientras que los perfiles de San Juancito (P1), Volcán (P2), Peje (P3), Llano Bonito (P4), El Ángel (P6), Buenos Aires (P10), Cordoncillo (P11), río Azul (P12), Puente (P13), Sabana La Pelona (P14), Alto Guadalajara (P16), quebrada Palma (P18) y Cacao (P19) son Ustox que tienen un horizonte kándico dentro de los 150 cm de la superficie del suelo mineral, cumpliendo los criterios del gran grupo de los **Kandiustox**.

En el cuadro 3.1 se muestran los valores de pH en H₂O y pH en KCl (1 N) en relación 1:1 de los horizontes que se encuentran dentro de los 125 cm de la superficie del suelo mineral, de los perfiles Guadalajara (P7), Convento (P9) y río Cañas (P17). Ya que varios de ellos presentaron valores de pH en KCl mayores a 5,0 fueron clasificados en el gran grupo **Acrustox**. El valor delta pH ($\Delta \text{pH} = \text{pH H}_2\text{O} - \text{pH KCl}$) es otro criterio dentro de los Oxisoles para definir el gran grupo *Anionic*, cuando este valor es 0 o de una carga neta de valor positivo, lo que no se presentó para los perfiles estudiados.

Cuadro 3.1. Valores de pH en H₂O, pH en KCl (1 N) y ΔpH para los perfiles de Guadalajara (P7), Convento (P11) y río Cañas (P17), clasificados en el gran grupo de los Acrustox.

Perfil	Nombre	Horizonte	Profundidad (cm)	Espesor (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH
P7	Guadalajara	Ap	0-10	10	4,22	5,03	-0,81
		Bt/A	10-42	32	4,35	5,24	-0,89
		Bt1	42-74	32	4,55	5,43	-0,88
		Bt2	74-112	38	5,27	5,77	-0,50
		Bt3	112-190	78	5,20	5,96	-0,76
P9	Convento	Ap	0-20	20	4,01	4,86	-0,85
		Bt1	20-47	27	4,01	4,72	-0,71
		Bt2	47-140	93	5,23	5,54	-0,31
		BC	140-200	60	5,32	5,55	-0,23
P17	Río Cañas	Ap	0-10	10	4,21	4,87	-0,66
		Bt1	10-38	28	4,25	4,87	-0,62
		Bt2	38-80	42	5,06	5,15	-0,09

Los perfiles de Dúrika (P15), La Ceiba (P20) y Las Juntas (P21), son Humults que no tienen un contacto dénsico, lítico, paralítico o petroférico dentro de los 150 cm de la superficie del suelo mineral; y dentro de los 150 cm de la superficie del suelo mineral, no tienen una disminución de arcilla de 20 % o más (relativo) del contenido máximo con el incremento de la profundidad, por lo que cumplen los criterios del gran grupo de los **Palehumults**.

En el caso de los Entisoles, se clasifican a nivel de suborden dentro de los Orthents, el criterio de entrada para gran grupo es el régimen de humedad, y ya que los perfiles se ubican en una zona con un régimen ústico, se clasifican como **Ustorthents**.

Criterios de clasificación taxonómica: Definición de subgrupo.

Entre los perfiles clasificados como Acrustox, el perfil de Convento (P9) reúne los criterios de 16 kg/m² o más de carbono orgánico entre la superficie del suelo mineral y una profundidad de 100 cm; y a una profundidad entre 25 y 125 cm a partir de la superficie del suelo mineral, más de 50 % de colores con un Hue de 2.5YR o más rojizo; y un value, en húmedo, de 3 o menos; por lo tanto, es un **Humic Rhodic Acrustox**.

El perfil de Guadalajara (P7), cumple solamente con el contenido de 16 kg/m² o más de carbono orgánico entre la superficie del suelo mineral y una profundidad de 100 cm, por lo que es un **Humic Acrustox**.

Y el perfil de río Cañas (P17) satisface los criterios de más de 50 % de colores con un Hue de 2.5YR o más rojizo; y un value, en húmedo, de 3 o menos a una profundidad entre 25 y 125 cm a partir de la superficie del suelo mineral, por lo que este perfil se clasifica como un **Rhodic Acrustox**.

Dentro de los Kandiuustox, el primer criterio que aplica para los perfiles estudiados es el de un contacto lítico dentro de los 125 cm de la superficie del suelo mineral, lo cual es el caso de los perfiles Volcán (P2) y Llano Bonito (P4), por lo que se clasifican como **Lithic Kandiuustox**.

Luego se presentan los criterios del contenido de 16 kg/m² o más de carbono orgánico entre la superficie del suelo mineral y una profundidad de 100 cm; y a una profundidad entre 25 y 125 cm a partir de la superficie del suelo mineral, más de 50 % de colores con un Hue de 2.5YR o más rojizo; y un value, en húmedo, de 3 o menos, los perfiles de San Juancito (P1) y Cordoncillo (P11), cumplen con estos criterios y se clasifican como **Humic Rhodic Kandiustox**.

El perfil de El Ángel (P6), cumple con el contenido de 16 kg/m² o más de carbono orgánico entre la superficie del suelo mineral y una profundidad de 100 cm, por lo que entran en el subgrupo de los **Humic Kandiustox**.

Los perfiles de Buenos Aires (P10), Sabana La Pelona (P14) y Cacao (P19) presentan a una profundidad entre 25 y 125 cm a partir de la superficie del suelo mineral, más de 50 % de colores con un Hue de 2.5YR o más rojizo; y un value, en húmedo, de 3 o menos, por lo que se clasifican como **Humic Rhodic Kandiustox**.

Mientras que los perfiles de Peje (P3), río Azul (P12), Puente (P13) y Alto Guadalajara (P16) y quebrada Palma (P18) no satisfacen los criterios de contenido de carbono orgánico y de color, por lo que se clasifican como **Typic Kandiustox**.

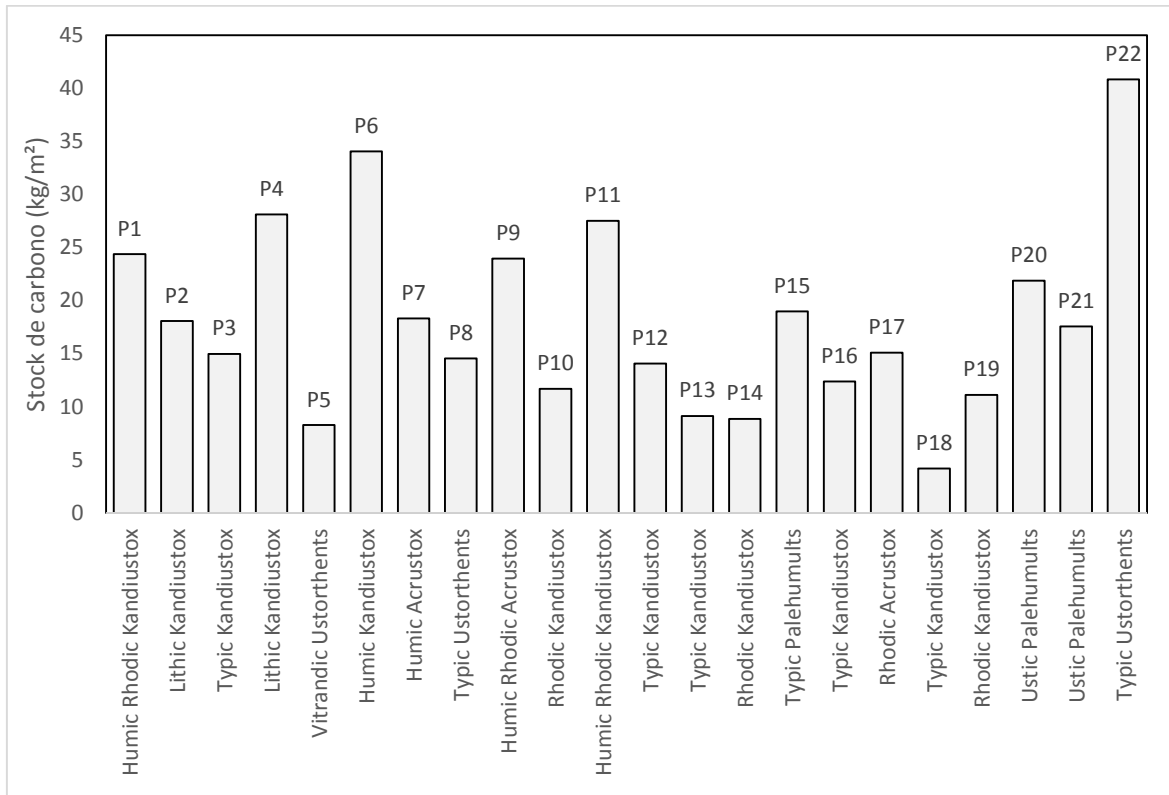


Figura 3.2. Stock de carbono (kg/m^2) a 100 cm de profundidad de los 22 perfiles clasificados.

Por otra parte, en los **Palehumults**, los perfiles La Ceiba (P20) y Las Juntas (P21) se ubican dentro de un área de régimen de humedad ústico, por lo que son **Ustic Palehumults**, y el perfil de Dúrika, que, por su posición fisiográfica, presenta condiciones climáticas particulares, hacen que este perfil presente un régimen de humedad údico, por lo que se clasifica como **Typic Palehumults**.

En cuanto a los Entisoles, el perfil de El Ángel Arriba (P5) posee a través de uno o más horizontes, un espesor total de 18 cm o más dentro de los 75 cm de la superficie del suelo mineral, una fracción de tierra-fina que contiene 30 % o más de partículas de 0,02 a 2,0 mm de diámetro y en esta fracción, 5 % o más de vidrio volcánico (figura 3.3), y $[(\text{Al más } \frac{1}{2} \text{ Fe, en \%}, \text{ extraídos con oxalato de amonio}) \times 60] \text{ más el vidrio volcánico (en \%)} \text{ igual a } 30 \text{ o más}$ (en este caso, el valor de horizonte A2 es de 45,5 %), por lo que se clasifica como un **Vitrandic Ustorthents**.

Finalmente, los perfiles Santa María (P8) y Ujarrás (P22), al no presentar características en particular dentro de los Ustorthents, se clasifican como **Typic Ustorthents**.

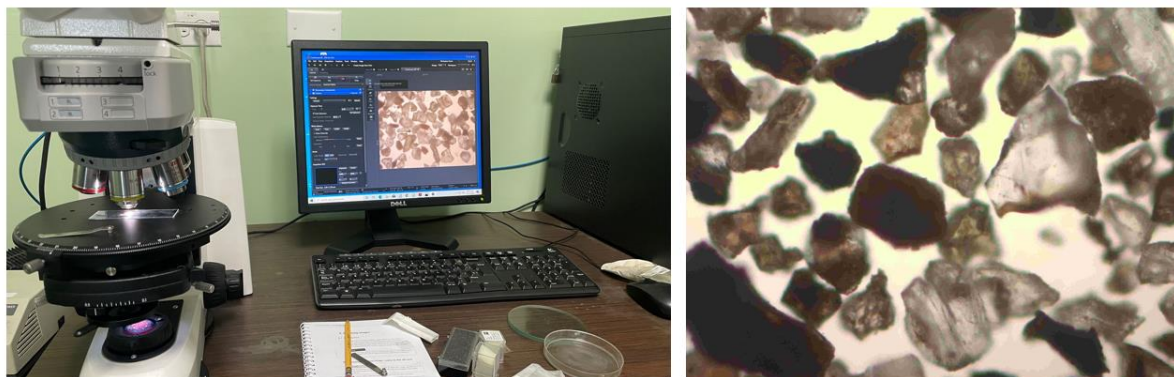


Figura 3.3. Determinación del porcentaje (%) de vidrio volcánico mediante conteo de granos en microscopio petrográfico, para el horizonte A2 (15-35 cm) del perfil El Ángel Arriba (P5), clasificado como Vitrandic Ustorthents.

Cuadro 3.2. Clasificación taxonómica a nivel de subgrupo de los perfiles modales descritos, según los criterios de la taxonomía de suelos del USDA.

Perfil	Nombre	Epipedón/Endopedón	Orden	Suborden	Gran grupo	Subgrupo**
P1	San Juancito	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Humic Rhodic Kandiustox
P2	Volcán	Ócrico/ Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Lithic Kandiestox
P3	Peje	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Typic Kandiestox
P4	Llano Bonito	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Lithic Kandiestox
P5	El Ángel Arriba	Ócrico/-	Entisol	Orthents	Ustorthents	Vitrandic Ustorthents
P6	El Ángel	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Humic Kandiestox
P7	Guadalajara	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Acrustox	Humic Acrustox
P8	Santa María	Ócrico/-	Entisol	Orthents	Ustorthents	Typic Ustorthents
P9	Convento	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Acrustox	Humic Rhodic Acrustox
P10	Buenos Aires	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Rhodic Kandiestox
P11	Cordoncillo	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Humic Rhodic Kandiustox
P12	Río Azul	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Typic Kandiestox
P13	Puente	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Typic Kandiestox
P14	Sabana La Pelona	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Rhodic Kandiestox
P15	Dúrika	Úmbrico/Argílico	Ultisol	Humults	Palehumults	Typic Palehumults
P16	Alto Guadalajara	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Typic Kandiestox
P17	Río Cañas	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Acrustox	Rhodic Acrustox
P18	Quebrada Palma	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Typic Kandiestox
P19	Cacao	Ócrico/Kándico*	Oxisol	Ustox	Kandiustox	Rhodic Kandiestox
P20	La Ceiba	Ócrico/ Argílico	Ultisol	Humults	Palehumults	Ustic Palehumults
P21	Las Juntas	Ócrico/ Argílico	Ultisol	Humults	Palehumults	Ustic Palehumults
P22	Ujarrás	Ócrico/-	Entisol	Orthents	Ustorthents	Typic Ustorthents

* Endopedón kándico con propiedades de minerales intemperizables de un endopedón óxico.

** Clasificación según la Clave para la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 2022).

Discusión

Diferentes autores mencionan que muchos de los Ultisoles identificados en Costa Rica deberían ser clasificados realmente como Oxisoles (Kesel y Spicer 1985; Nieuwenhuys *et al.* 1996; Wilcke *et al.* 2000; Kleber *et al.* 2007; Alvarado *et al.* 2014). Tal y como ocurrió con los perfiles estudiados, la mayoría cumplió con los criterios para ser considerados Oxisoles, lo que demuestra su presencia y dominancia en el área de estudio, por lo que se requieren más investigaciones que realicen caracterizaciones de suelos más detalladas, que permitan conocer y dimensionar la situación real de los Oxisoles en Costa Rica.

Los Oxisoles son suelos minerales de zonas tropicales cálidas y húmedas que han sido sometidos a intensos periodos de meteorización, en ellos predominan los óxidos de hierro y aluminio, poseen capacidad de intercambio catiónico de menos de 16 cmol(+)/kg de arcilla; al igual que los Ultisoles, las condiciones climáticas provocan el lixiviado de sus bases hacia el interior del suelo que junto con la acumulación de arcillas y sesquióxidos que constituyen su característico horizonte kándico (Ibáñez *et al.* 2011a).

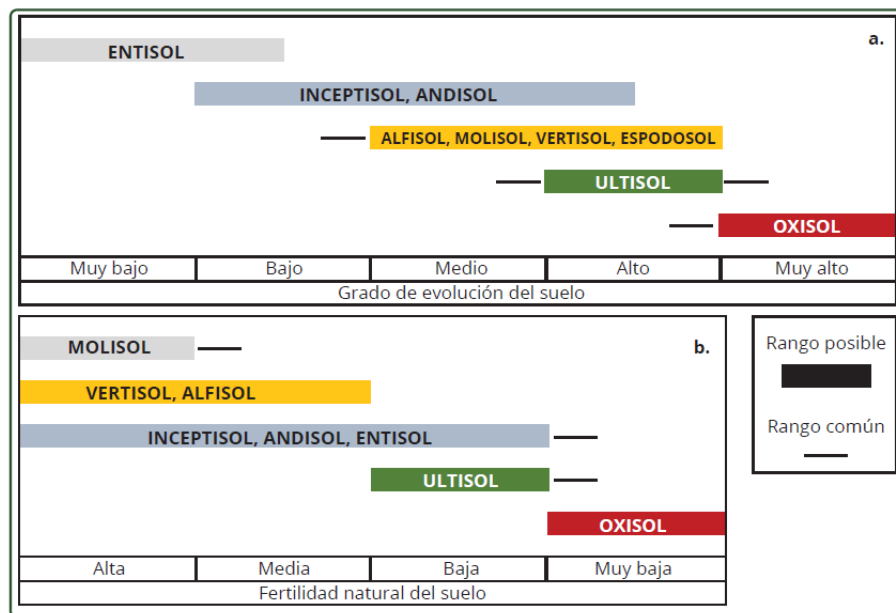


Figura 3.4. Órdenes de suelo y su evolución con el grado de evolución (a) y su fertilidad (b). Tomado de Jaramillo *et al.* (1994).

Los Oxisoles y Ultisoles se encuentran principalmente en la zona norte (Sarapiquí, San Carlos, Cutris), en el sur (Pérez Zeledón, Buenos Aires y en las regiones fronterizas con Panamá) y en las estribaciones de la Cordillera de Talamanca hacia el Pacífico y el Atlántico (Alvarado *et al.* 2014; Camacho 2016; Betrano 2017; Henríquez *et al.* 2017; Camacho *et al.* 2021). Krishnaswamy y Richter (2002) al estudiar el efecto que tiene el uso de la tierra y el avanzado estado de meteorización sobre las propiedades de algunos suelos en los abanicos aluviales del Valle del General, encontraron Entisoles en depósitos aluvionales recientes, y Oxisoles y Ultisoles en superficies más antiguas y estables. Dataciones de diferentes horizontes de estos suelos permiten concluir que tienen su origen hace 9 000 a 65 000 años dependiendo de la profundidad, es decir se ubican entre el periodo del Pleistoceno y el Holoceno de la era Cuaternaria (Kesel y Spicer 1985; Driese *et al.* 2007; Pelt *et al.* 2008).

Los Oxisoles pueden mostrar 40 % o más (por peso) de arcilla en la fracción de tierra-fina (< 2 mm) en la capa comprendida entre la superficie del suelo y una profundidad de 18 cm, como ocurre en los perfiles estudiados clasificados como Oxisoles; y un horizonte kándico con el límite superior dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral (Ibáñez *et al.* 2011a). Es conocido que en Oxisoles y Ultisoles, la dispersión de los microagregados de arcilla del tamaño del limo, ha sido una problemática debido a las fuertes fuerzas de interacción causadas por la unión de los óxidos de aluminio, óxidos hierro y los dominios de materia orgánica, por lo que los contenidos de arcilla suelen ser mayores a los reportados en los resultados de los análisis de laboratorio (Leão 2016). Los Oxisoles poseen bajos contenidos de bases intercambiables y una acidez intercambiable alta (West *et al.* 1997; Buol *et al.* 2003). Los Oxisoles son suelos muy antiguos que se caracterizan por poseer un grado de meteorización extrema, por lo cual presentan una fuerte acidez y han perdido casi toda la capacidad para suplir nutrimentos a las plantas (CIAT 1983; Ibáñez *et al.* 2011a).

De los Oxisoles encontrados, se clasificaron cinco perfiles como Typic Kandistox (Peje P3, río Azul P12, Puente P13, Alto Guadalajara P16 y quebrada Palma P18); tres como Rhodic Kandistox (Buenos Aires P10, Sabana La Pelona P14 y Cacao P19), dos Lithic Kandistox (Volcán P2 y Llano Bonito P4); dos como Humic Rhodic Kandistox (San Juancito P1, Cordoncillo P11); un Humic Kandistox (El Ángel P6); un Humic Acrustox (Guadalajara

P7), un Rhodic Acrustox (río Cañas P17) y un Humic Rhodic Acrustox (Convento P9). Los Acrustox se diferencian de Kandiuustox, porque han perdido gran parte de su capacidad de retención de cationes en la fracción mineral, son suelos muy poco productivos y con escasa vegetación natural, por lo que pueden ser suelos aún más meteorizados que los Kandiuustox (Rozas-López 2010).

La diferenciación a nivel de subgrupo, tanto en los Acrustox como en los Kandiuustox, en los perfiles estudiados se da por aspectos de coloración y el stock de carbono en los primeros 100 cm del perfil. El subgrupo Rhodic, abarca tonalidades rojizas (2.5 YR o más rojizas), las cuales dependen del contenido de hierro en el material parental (Tawornpruek *et al.* 2005); por ejemplo, los contenidos de hematita confieren colores rojizos (2.5 YR-5 R), incluso cuando está presente en cantidades pequeñas (Schaefer *et al.* 2008). El color del suelo es un indicador confiable de la mineralogía de los óxidos de hierro que reflejan la génesis del suelo e influye en las propiedades que afectan el crecimiento de las plantas (Curi y Franzmeier 1984). En cuanto al contenido de carbono, se sabe que los Oxisoles almacenan aproximadamente un 7,5 % del carbono de los suelos (Eswaran *et al.* 1993). La disminución y pérdida de este carbono depende no solo de la clase de suelo, sino también sobre las diferentes prácticas de labranza que se apliquen y su intensidad, por lo que los contenidos de carbono pueden variar según el uso que se les dé a las tierras (Salimon *et al.* 2009), lo que influye en que un Oxisol cumpla con los criterios de stock de carbono, para que pueda clasificarse como Humic. Es así, que, en la clasificación de los Oxisoles, como los estudiados en esta investigación, la clasificación a nivel de subgrupo depende de las combinaciones del contenido de materia orgánica y de los minerales de óxidos de hierro presentes en los suelos (Tawornpruek *et al.* 2005), y si no cumplen una u otra se clasificarían como Typic (Rozas-López 2010), como los Oxisoles clasificados por Espejo *et al.* (2002).

Los Ultisoles tienen menor desarrollo pedológico que los Oxisoles, presentan acumulación de arcilla iluviada de horizontes superiores que forman finas películas que recubren los poros y agregados del suelo como en los perfileses Dúrika (P15), La Ceiba (P20) y Las Juntas (P21). Estos suelos se localizan en posiciones geomorfológicas antiguas, están asociados con climas cálidos y húmedos que presentan una estación con precipitación deficiente, causando una

alteración rápida y casi completa de los minerales meteorizables, con formación de arcillas y óxidos (CIAT 1983; Soil Survey Staff 2006b). Dos de los perfiles estudiados se clasificaron como Ustic Palehumults (La Ceiba P20 y Las Juntas P21) y uno se clasificó Typic Palehumults (Dúrika P15). El color de estos suelos varía según el grado de hidratación del hierro, por lo que se pueden encontrar con tonalidades pardo rojizo o rojizo cuando el hierro está oxidado y pardo amarillento y amarillento cuando el hierro se encuentra en su forma hidratada (Chinchilla *et al.* 2011).

Como mencionan Chávez y Chavarría (2017), los Humults son Ultisoles con buenos contenidos en materia orgánica, pero sin hidromorfismo (ausencia de oxígeno); el prefijo Pale indica que son suelos pedogenéticamente desarrollados, lo que se evidencia en los altos contenidos de arcilla que se encuentran en los perfiles de suelo, como el de Dúrika (P15), La Ceiba (P20) y Las Juntas (P21) (Moreno e Ibañez 2020). De manera que estos suelos se pueden considerar maduros desde el punto de vista pedológico, aunque no tanto como los Oxisoles de esta zona; las diferencias en el grado de desarrollo se pueden deber a condiciones climáticas y de cobertura del suelo (Tawornpruek *et al.* 2005).

La diferenciación entre los Ustic Palehumults y los Typic Palehumults, viene dada por el régimen de humedad del suelo; aunque la taxonomía no hace diferenciación, los Typic Palehumults son de régimen de humedad údico, lo que modifica las reacciones químicas y actividades microbiológicas que se dan en estos suelos por el hecho de contar con más humedad. El perfil Dúrika (P15), representa muy bien las características que describe Laffont (2016), el cual indica que estos suelos se encuentran en bosques, y aunque tienen una saturación de bases inferior al 35 %, por el método de suma de cationes, y la capacidad de intercambio catiónico es baja, estas propiedades suelen mejorar debido al reciclaje de la materia orgánica. Los Ustic Palehumults pertenecen a un régimen de humedad ústico, por lo general con condiciones más limitantes, como la falta de humedad, baja capacidad de intercambio catiónico, alta acidez y escasa fertilidad, que hacen necesarias la adopción de medidas adecuadas para la producción, como la aplicación de cal, fertilizantes, enmiendas orgánicas, además de prácticas de conservación de suelos (Srinivasan *et al.* 2013).

Por otro lado, los Entisoles son suelos de reciente formación, poseen un epipedón ócrico y tienen escasas evidencias de desarrollo de horizontes pedogenéticos; sus propiedades están fuertemente determinadas por el material parental que les dio origen (Ibáñez *et al.* 2011b), como se ha demostrado en los resultados de las características químicas de los perfiles. El Ángel Arriba, Santa María (P8) y Ujarrás (P22) clasificados dentro de este orden. Los suelos derivados de aluviones jóvenes con capas de poca profundidad o suelos que se encuentran sobre roca dura, tienen poco desarrollo debido a que se localizan en sitios extremos de humedad o sequedad, lo que retarda la alteración del material original; y la resistencia del material original a la alteración física, química y microbiológica. Los Entisoles encontrados en los ápices de los abanicos aluviales de Buenos Aires de Puntarenas se clasificaron como Vitrandic Ustorthents (El Ángel Arriba P5) y Typic Ustorthents (Santa María P8 y Ujarrás P22).

Los Ustorthents son Entisoles de régimen de humedad ústico, que se han formado sobre superficies erosionadas, su posición fisiográfica se asocia a superficies inestables lo que les impide desarrollarse y por lo general, son poco profundos (Ibáñez *et al.* 2011b). La diferenciación entre los perfiles clasificados como de El Ángel Arriba (P5) y Santa María, se da a nivel de subgrupo. El subgrupo Vitrandic del perfil El Ángel Arriba (P5), indica la presencia de propiedades ándicas, en este caso los subgrupos vitrándicos de la taxonomía se refieren a vidrio volcánico (Wilson *et al.* 1999). El vidrio volcánico corresponde a minerales vítreos y vítreos-recubiertos ricos en sílice, son parte dominante en tefras poco alteradas, y pueden descomponerse a minerales de baja cristalinidad como alófana, imogolita y ferrihídrita (Alvarado *et al.* 2014). Para conocer la procedencia de estos materiales volcánicos en el perfil El Ángel Arriba (P5) en Buenos Aires de Puntarenas, se requieren de análisis específicos; sin embargo, en la literatura se considera que estos materiales vienen del Volcán Barú (Sherrot *et al.* 2008; Alvarado *et al.* 2014), ubicado al oeste de la República de Panamá a 3473 m s. n. m. (Bergoing 2008). Los perfiles Santa María (P8) y Ujarrás, se clasificaron como Typic Ustorthents que son suelos de poco desarrollo edáfico (Chinchilla *et al.* 2011), son suelos comunes en los abanicos aluviales y suelen contener fragmentos gruesos, lo que limita la profundidad efectiva de estos suelos (Khosravani *et al.* 2020). Al clasificarse en el subgrupo Typic, se entiende que estos suelos no poseen características particulares o

distintivas que los distinguen de otros Ustorthents, por lo que son los más comunes (Rozas-López 2010).

Conclusiones

- Según el registro de datos climáticos, se puede establecer que Buenos Aires de Puntarenas, posee un régimen de humedad ústico, lo que indica que el suelo está seco por más de 90 días acumulados en años normales.
- Los Oxisoles, de los subgrupos Kandustox y Acrustox son los suelos dominantes en Buenos Aires de Puntarenas.
- Los contenidos de óxidos de hierro y materia orgánica son importantes aspectos que influyen en la clasificación taxonómica de los Oxisoles ubicados en Buenos Aires de Puntarenas.
- Los perfiles clasificados como Palehumults, son suelos maduros desde el punto de vista pedológico ya que contienen altos contenidos de arcilla.
- Dependiendo de su ubicación en los abanicos aluviales de Buenos Aires de Puntarenas, los Entisoles se pueden clasificar en diferentes subórdenes.

Literatura citada

Alvarado, A; Mata, R; Chinchilla, M. 2014. Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931–2014: II. Mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxídico caoliníticas. *Agronomía Costarricense*. 38 (1): 107-131 p.

Balasubramanian, A. 2017. *Soil Taxonomy & Classification*. Centre for Advanced Studies in Earth Science, University of Mysore, Mysore. 7 p. 10.13140/RG.2.2.15832.08964.

Bergoeing, JP. 2008. Interpretación geomorfológica del volcán Barú, Panamá. *Revista Geográfica*. No. 14. 117-124 p.

Betrano, S. 2017. Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Evolución sobre la legislación sobre uso del suelo en Costa Rica (1949-2016). 472 p.

Bockheim, J; Gennadiyev, A; Hammer, R; Tandarich, J. 2005. Historical development of key concepts in pedology. *Geoderma*. 124. 23-36. 10.1016/j.geoderma.2004.03.004.

Brevik, E. 2010. Early soil knowledge and the birth and development of soil science. *Catena*. 83. 23-33. 10.1016/j.catena.2010.06.011.

Buol, SW; Hole, FD; McCracken, RJ. 1990. *Génesis y clasificación de suelos*. 2 Ed. Trillas, D. F. México. 417 p.

Buol, SW; Southard, RJ; Graham, RC; McDaniel, PA. 2003. *Soil genesis and classification*. 5 Ed. Blackwell Publishing. Iowa, USA. 494 p.

Camacho, ME. 2016. *Genesis y clasificación de algunos Ultisoles y Oxisoles de Costa Rica*. Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica. 185 p.

Camacho, ME; Mata, R; Barrantes-Viquez, M; Alvarado, A. 2021. Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. *CATENA*, 197, 104992.

Chávez, MA; Chavarría, E. 2017. Tipos de suelo y producción de caña de azúcar en Costa Rica: Primera aproximación taxonómica. Congreso Nacional de Suelos, 9, San José, Costa Rica, 2017. Memorias. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). San José, Costa Rica. 6 p.

Chinchilla, M; Alvarado, A; Mata, R. 2011. Factores formadores y distribución de suelos de la subcuenca del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 35 (1): 33-57. ISSN: 0377-9424.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1983. Oxisoles y Ultisoles en America Tropical. I. Distribución, importancia y propiedades físicas. Cali, Colombia. 56 p.

Churchman, GJ. 2010. The philosophical status of soil science *Geoderma*. 157. 214-221 p. 10.1016/J.GEODERMA.2010.04.018

Curi, N; Franzmeier, DP. 1984, Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 341-346 p. doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020024x

Day, PR. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. *In* Black, CA. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Vol. 1. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. 545-567 p.

Delgado, O; Carpio, C; Padilla, F; Ureña, F. 2011. Prospección Región del Diquís, Cantón de Buenos Aires. MIVAH – DVAH. 61 p.

Díaz-Romeu, R; Balerdi, F. 1967. Determinación de la Capacidad de Intercambio de Cationes del Suelo. IICA. Turrialba. Costa Rica. Modificado del método de Bower CA, *et*

al., 1952. Exchangeable cations analysis of saline and alkaline soils. *Soil Science*. 73: 251-261 p.

Driese, SG; Orvis, KH; Horn, SP; Li, Z; Jenninngs, DS. 2007. Paleosol evidence for Quaternary uplift and the climate and ecosystem changes in the Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 248: 1–23 p.

Elementar Analysensysteme GmbH. 2009. CHNOS Elemental Analyzer vario macro cube. Operating Instructions. Hanau, Alemania. 667 p.

Espejo, R; Gómez, V; Teshome, T; Peregrina, F; Pérez, C. 2002. Incidencia del incremento de temperatura del suelo durante la quema de matorral sobre la textura de la capa más superficial del suelo en las "machambas" de Cabo Delgado (Mozambique). *Edafología*, ISSN 1135-6863, Vol. 9, Nº. 2, 2002. 153-160 p.

Eswaran, H; Berg, E; van D; Reich, P. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J. V. 57*, n. 1. 192-194 p.

FAO–UNESCO. 1974. Soil map of the world, 1, Legend, Paris, France.

Forsythe, W. 1985. Física de suelos. Manual de laboratorio. IICA, Costa Rica. 212 p.

Henríquez, C; Cabalceta, G; Bertsch, F; Alvarado, A. 2017. Principales suelos de Costa Rica. Origen, características y manejo. Editado por la ACCS (Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo). San José, Costa Rica. 7 p.

Ibáñez, S; Gisbert, JM; Moreno, H. 2011a. Oxisoles. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal. 6 p.

Ibáñez, S; Gisbert, JM; Moreno, H. 2011b. Entisoles. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal. 7 p.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2015. Suelos y tierras de Colombia (Vol. 1). [https:// www.igac.gov.co/es/ catalogo/suelos-y-tierrasde- colombia-tomo-1-y-2](https://www.igac.gov.co/es/catalogo/suelos-y-tierrasde-colombia-tomo-1-y-2).

INDER (Instituto de Desarrollo Rural). 2014. Región Brunca. Territorio Buenos Aires–Coto Brus. Informe de caracterización del territorio. San José, Costa Rica. 71 p.

Jaramillo, DF; Parra, LN; González, LH. 1994. El recurso suelo en Colombia: Distribución y evaluación. Universidad Nacional de Colombia.

Jassó, F; Horváth, B; Izsó, I; Király, L; Parászka, L; Kele, G. 1989. Guidelines for the large-scale soil mapping. Agroinform, Budapest.

Kesel, RH; Spicer, BE. 1985. Geomorphologic relationships and ages of soils on alluvial fans in the río General Valley. Costa Rica. *Catena*. 12: 149–166 p.

Khosravani, P; Baghrnejad, M; Abtahi, SA; Ghasemi, R. 2020. Soil Genesis and Classification of Available Soils along a Toposequence in Farsarood Region of Darab City, Fars Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 50(10), 2539-2553 p. doi: 10.22059/ijswr.2019.280278.668186

Kleber, M; Schwendenmann, L; Veldkam, E; Roffner, J; Jahn, R. 2007. Halloysite versus gibbsite: silicon cycling as a pedogenetic process in two lowland Neotropical rain forest soils of La Selva, Costa Rica. *Geoderma*. 138: 1-11 p.

Krishnaswamy, J; Richter, DD. 2002. Properties of advanced weathering-stage soils in tropical forests and pastures. *Soil Science Society America Journal* 66: 244-253 p.

Laffont, JT; Cárcamo, V. 2016. Respuesta de Un suelo Typic Palehumult (Ultisoles) serie Metrenco a la aplicación de Ácido Mono Silícico. Facultad de Agronomía Universidad Adventista del Bio Bio. Chile. Artículo técnico. 4 p.

Leão, TP. 2016. Particle size distribution of Oxisols in Brazil. *Geoderma Regional*. Volume 7, Issue 2. 216-222 p.

Matchavariani, L. 2019. The Soils of Georgia. *World Soils Book Series*. 10.1007/978-3-030-18509-1.

Mikhailova, EA; Zurqani, HA; Post, CJ; Schlautman, MA; Post, GC; 2021. Soil Diversity (Pedodiversity) and Ecosystem Services. *Land* 10 (3): 288 p. <https://doi.org/10.3390/land10030288>

Mill, JS. 1925. *A system of logic*, 8 Ed. Longmans, Green, and Co., Londres.

Mondal, B. 2021. *Concept and approaches in soil science study and soils of India*.

Moon, D. 2020. Soil Science I. In *The American Steppes: The Unexpected Russian Roots of Great Plains Agriculture, 1870s–1930s (Studies in Environment and History*, pp. 188-225). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781316217320.006

Moreno, H; Ibáñez, S. 2020. *Soil Taxonomy: Nomenclatura y principios de clasificación de los suelos*. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal. 10 p.

Nieuwenhuys, A. 1996. Soils, geology, and soil-related sustainability aspects of the perhumid tropical Limón basin, Costa Rica. *Serie Técnica. Informe Técnico*. No. 272. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 85 p.

Obando, LG; Kussmaul, S. 2009. Mapa geológico de la hoja Buenos Aires, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. 41: 2 p.

Pelt, E; Chabeaux, F; Innocent, C; Navarre, AK; Sak, PB; Brantley, SL. 2008. Uranium-thorium chronometry of weathering rinds: rock alteration rate and paleo-isotopic record of weathering fluids. *Earth and Planetary Science Letters*. 276: 98-105 p.

Rozas-López, JL. 2010. Diccionario de términos edafológicos. Vol 1. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. España. 544 p.

Salimon, CI; Wadt, PGS; de Souza Alves, S. 2009. Decrease in carbon stocks in an oxisol due to land use and cover change in southwestern Amazon. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. Vol. 4. Num. 2, 2009. 57-65 p.

Schaefer, C; Fabris, J; Ker, J. 2008. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): A review. *Clay Minerals - CLAY MINER*. 43. 137-154 p.

Sherrod, DR; Vallance, JW; Tapia, A; McGeehin, JP. 2008. Volcán Barú, eruptive history and volcano-hazards assessment. Reston, Virginia. U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1401. 33 p.

Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE. Natl. Soil Surv. Ctr., Lincoln, NE (September).

Smith, GD. 1968. Soil classification in the United States. World soil resources report 32. FAO, Roma, Italia. 6-24 p.

Soil Survey Laboratory Methods Manual. 2006a. SSIR No. 42. *USDA Natural Resources Conservation Service*. U. S. Govt. Printing Office, Washington, D. C, USA.

Soil Survey Staff. 2006b. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 20 Ed. Washington, D, C, USA. 341 p.

Soil Survey Staff. 2022. Keys to Soil Taxonomy, 13 edition. USDA Natural Resources Conservation Service.

Srinivasan, R; Natarajan, A; Anil Kumar, KS; Kalaivanan, D. 2013. Characterization of major cashew-growing soils of Dakshina Kannada district of Karnataka. *Agropedology*. 23 (2), 59-64 p.

Szabolcs, I. 1966. Methodology of the genetic farm scale soil mapping. OMMI Genetikus Talajtérképek. Ser, 1.

Tóth, G; Montanarella, L; Stolbovoy, V; Máté, F; Bódis, K. Jones, A; Van Liedekerke, M. 2008. Soils of the European Union. JRC Scientific and Technical Reports. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Tawornpruek, S; Kheoruenromne; I; Suddhiprakarn, A; Gilkes. RJ. 2005. Microstructure and water retention of Oxisols in Thailand. *Australian Journal of Soil Research*. 43, 973–986 p.

Ulloa, A; Delgado; CE. 2010. Características geoquímicas y mineralogía de las rocas magmáticas del flanco Pacífico Central de la Cordillera de Talamanca: Implicaciones para la evolución de una corteza continental. Tesis para optar por el grado académico de Licenciado en Geología. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. 177 p.

West, LT; Sumner, FBM; Kang, BT. 1997. Ultisols: Characteristics and impacts on society. *Advances in agronomy*. 63: 179-239 p.

Wilcke, W; Kretschmar, S; Bundt, M; Saborío, G; Zech, W. 2000. Depth distribution of aluminum and heavy metals in soils of Costa Rica coffee cultivation areas. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 163: 499-502 p.

Williamson, WTH. 1959. The discipline of soil science. *Journal of Soil Science*, 10: 1-4 p.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1959.tb00660.x>

Wilson, MA; Burt, TD; Thomas, JE. 1999. Volcanic Glass Analyses of Multiple Fine-Earth Fractions. *Soil Survey Horizons*. Volume 40. Issue 2. 29-35 p.

**CAPÍTULO 4. MINERALOGÍA DE ARCILLAS Y CLASIFICACIÓN
TAXONÓMICA A NIVEL DE FAMILIA MINERALÓGICA DE LOS SUELOS
ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES
ANTIGUOS EN BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA.**

Introducción

El término mineral de arcilla se refiere a minerales filosilicatos que imparten plasticidad al suelo al humedecerse y que se endurecen al secarse, los minerales de arcilla son capas de silicatos que se forman generalmente como productos de la meteorización química de otros minerales de silicato en la superficie de la tierra (Al-Ani y Sarapää 2008). Las arcillas son el producto final de la meteorización de los silicatos, por lo que son los principales constituyentes de la mayor parte de los suelos del mundo (Alvarado *et al.* 2014). El término arcilla se aplica tanto a materiales con un tamaño de partícula menor a 2 μm , independientemente de su composición química, como a la familia de minerales con composición química similar y características estructurales cristalinas (Velde 1995); las arcillas pueden estar compuestas por mezclas de minerales arcillosos de grano más fino y cristales del tamaño de arcilla de otros minerales como cuarzo, carbonato y óxidos metálicos (Foley 1999).

Las arcillas son dominantes como minerales secundarios y representan el producto de neoformación, proceso mediante el cual se forman nuevos materiales no heredados de ninguna parte de su estructura de un mineral preexistente (Chesworth 2008), que se forman en el suelo y el subsuelo por los procesos de meteorización de los minerales primarios; debido a esto, las arcillas son reflejo de las condiciones de formación del suelo, de forma que las arcillas encontradas en suelos muy evolucionados son diferentes a aquellas encontradas en suelos de poco desarrollo pedogenético (Buol *et al.* 1981). El estudio de las transformaciones mineralógicas que se producen durante los procesos de edafogénesis permite establecer secuencias y tipos de evolución de los materiales geológicos que influyen la formación del suelo (Birkeland 1974).

Las arcillas del suelo se forman por diferentes arreglos de láminas de tetraedros de silicio y octaedros de aluminio, que se unen formando capas unidas por cationes en unos casos y en otros por una lámina de octaedros. Estas uniones de capas producen una gran diversidad de arcillas con propiedades específicas, y que se pueden asociar con óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos de hierro y aluminio y compuestos orgánicos de origen secundario (Alvarado *et al.* 2014).

Las características comunes a todos los minerales arcillosos se derivan de su composición química, estructura estratificada y tamaño. Todos los minerales arcillosos tienen una gran afinidad por el agua. Algunos se hinchan fácilmente y pueden duplicar su espesor cuando están mojados. La mayoría tiene la capacidad de absorber iones (átomos y moléculas cargados eléctricamente) de una solución y liberar los iones más tarde cuando las condiciones cambian (Foley 1999). Los minerales arcillosos son numerosos y diferenciándose por su forma, estructura, apilamiento de las capas y por la simetría de la red que forman entre sí, estas redes estructurales no son perfectas, generalmente presentan huecos por falta de iones o por sustitución de unos iones por otros que modifican la estructura y generan diferentes familias de arcillas (Espitia *et al.* 2003).

Alvarado *et al.* (2014) indican que, para estudios edafológicos las arcillas se consideran por su importancia sobre las propiedades físicoquímicas y biológicas de los suelos. Las arcillas condicionan la fertilidad del suelo, ya que pueden adsorber cationes y en menor cantidad aniones y retener agua entre sus láminas, debido a sus cargas negativas dominantes y cargas positivas en algunos casos (Besoain 1985). De este modo, tienen la capacidad de retener elementos que definen la fertilidad potencial de los suelos, y que están relacionados directamente con la saturación de bases, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la capacidad de intercambio aniónico (CIA) (Alvarado *et al.* 2014). Los iones pueden ser atraídos a la superficie de una partícula de arcilla o absorbido dentro de la estructura de estos minerales, esta propiedad permite que los iones en solución se fijen en superficies de arcilla o dentro de sitios internos, incluyendo todo tipo de iones, además de moléculas orgánicas como los pesticidas; por lo que las arcillas son un vehículo importante en el transporte y dispersión de partículas contaminantes de un área a otra (Foley 1999).

Las arcillas, también influyen en las propiedades físicas de los suelos, como por ejemplo en la capacidad de retención de agua, la velocidad de infiltración, la conductividad hidráulica, la adhesividad, la plasticidad, la contracción y expansión, así como en los procesos de intercambio gaseoso a nivel radicular (Alvarado *et al.* 2014). Es conocido que la textura del suelo media fuertemente la disponibilidad de agua de la planta a través de su control sobre las características hidráulicas del suelo (Hultine *et al.* 2005), porque la conductividad hidráulica del suelo es una función del tamaño de los poros; ya que los suelos de textura más gruesa tienen poros más grandes y una conductividad más alta que los suelos de textura más fina, donde domina la fracción arcillosa (Jury *et al.* 1991). Los suelos de textura gruesa, sin embargo, pierden más agua y tienen menor conductividad a potenciales hídricos del suelo más altos que los suelos de textura fina, hasta el punto de que las plantas que crecen en suelos gruesos agotan su suministro de agua a potenciales hídricos más altos que las plantas que crecen (Hultine *et al.* 2005).

El estudio de las arcillas y los minerales arcillosos es de suma importancia debido a que el punto en común de varias ciencias estrechamente integradas y ciencias aplicadas. Entre las ciencias se encuentran la química, la física, la mineralogía y la geología; y en el campo de las ciencias aplicadas, cerámica, ingeniería y agricultura. Gran parte del interés por los minerales arcillosos se debe a problemas relacionados con la estructura, las propiedades físicas, el origen y la presencia de los minerales arcillosos (Auckland 1959). Y en el estudio de los suelos, el porcentaje de minerales intemperizables o resistentes es un criterio que se utiliza para la definición de un horizonte óxico, así como para conocer el desarrollo pedogenético de un suelo (Alvarado-Hernández 2022).

Composición mineralógica del suelo

La composición mineralógica del suelo parte de la identificación de los minerales arcillosos simples e interstratificados que lo componen, así como otros minerales presentes en mayor o menor proporción (Espitia *et al.* 2003). Para conocer la composición mineralógica del suelo es muy importante tener en cuenta la gran variedad de minerales y rocas que se forman a partir de los 118 elementos básicos de la tabla periódica; que pueden originar, desde materiales compuestos por elementos puros con arreglos geoquímicos sencillos, hasta

minerales sumamente complejos que pueden combinar varios elementos; y los cuales son el punto de partida para la formación de minerales primarios y secundarios que componen el suelo (Moscote *et al.* 2018).

Para Goldschmidt (1937), ciertas rocas y minerales tienen elementos característicos o presentan una concentración típica de un elemento en particular, lo que significa que existe una relación entre la geología y la dispersión de los elementos, de modo que se puede conocer que la distribución de los elementos químicos en distintas unidades geológicas sobre las que se desarrollan los suelos. Así, Goldschmidt (1937) estudió la distribución geoquímica de los minerales en la tierra, partiendo de un estado inicial de la Tierra, compuesta por un grupo con tres elementos mayores (hierro, níquel y silicatos); y dedujo que luego del enfriamiento paulatino del planeta, ocurrió una separación de materiales, en tres fases: fase de metales, fase de sulfuros y fase de silicatos (Orrillo 2014). Clasificando los elementos en función de su afinidad geoquímica en siderófilos, calcófilos, litófilos, atmófilos y siderófilos (Goldschmidt 1937). Los silicatos, óxidos, sulfuros, carbonatos y sulfatos son los minerales más abundantes en la superficie terrestre, estos minerales sufren una serie de procesos y se llegan a transformar en rocas con composiciones y características variables, que se dividen en tres importantes grupos (ígneas, sedimentarias y metamórficas) cada uno con características similares en cuanto a su génesis, texturas y composición (Moscote *et al.* 2018). De esta forma, una roca se define como una asociación inorgánica de uno o varios minerales originados en forma natural por procesos geológicos endógenos o exógenos (Orozco-Centeno *et al.* 2014).

Las rocas ígneas se forman a partir del enfriamiento y solidificación del magma, el cual se puede derivar de derretimientos parciales de rocas preexistentes en la corteza terrestre (Mibei 2014); están asociadas con la actividad volcánica y su distribución está controlada por placas tectónicas (Carlson *et al.* 2008). Según su proceso de formación, las rocas ígneas se clasifican en intrusivas o plutónicas, aquellas que se forman en zonas profundas de la corteza, bajo presiones que no permiten el escape de gases, presentan cristales grandes y bien formados (Orozco-Centeno *et al.* 2014); y efusivas o volcánicas, que son las que se forman a partir del magma que fluye hacia la superficie terrestre a través de zonas de debilidad o que fue

expulsado desde un volcán (Williams *et al.* 1982). Las rocas sedimentarias se constituyen por la acumulación de sedimentos y partículas producto de la meteorización de otro tipo rocas, acumulación de material de origen biológico, por la precipitación de sustancias químicas o bioquímicas, o por la combinación de todas las anteriores (Orozco-Centeno *et al.* 2014), que luego de depositadas se comprimen hasta convertirse en una roca dura (Coleman 2016). Las rocas metamórficas son rocas ígneas, sedimentarias u otras rocas metamórficas cuya textura y composición ha cambiado por el metamorfismo, proceso que ocurre como respuesta a cambios en el ambiente físico o químico de cualquier roca preexistente, ya sean variaciones de presión o temperatura, deformación o infiltración de fluidos, que tiene como resultado recristalización de minerales existentes en nuevos granos, la aparición de nuevas fases minerales o la descomposición de otras fases (Putnis y Austrheim 2010).

El mineral más frecuente y común de encontrar en la estructura de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias es el cuarzo, se caracteriza por ser estable bajo 573 °C, posee un grado 7 en la escala de Mohs, no presenta exfoliación y tiene una baja solubilidad en agua (Bustillo 1989). Las rocas silicatadas constituyen el 90 % de la corteza terrestre y sus principales minerales forman la mayor parte de la fracción sólida inorgánica de los suelos (Imbellone *et al.* 2017). Otros minerales importantes son los carbonatos, como la calcita y la dolomita; y la apatita, fuente original inorgánica de prácticamente todo el fósforo que se encuentra en el suelo (Conti 2007). El punto de partida de los procesos de alteración de las rocas son los minerales primarios, estos minerales son aquellos vinculados a las etapas de evolución en profundidad de la corteza terrestre, formados en condiciones de temperatura y de presión, superiores a las de la superficie (González 2017).

Los minerales silicatados presentan una estructura básica conformada por un átomo de silicio y cuatro átomos de oxígeno, con enlaces covalentes de alta energía, que se organizan formando un tetraedro de alta estabilidad (Nanzyo y Kanno 2018). Estos tetraedros se organizan al compartir oxígenos conformando estructuras de diferente complejidad; los neosilicatos, son estructura más simple, están formados por tetraedros individuales y sus cargas están saturadas por cationes mono y divalentes, como el olivino y el zircón; sorosilicatos, que se forman por la unión de dos tetraedros de silicio al compartir un átomo

de oxígeno de forma que la carga generada es complementada con cargas de átomos de cationes, como el epidoto y la hemimortita; ciclosilicatos, la estructura se compone por tres o más tetraedros formando un anillo, como por ejemplo la turmalina y el berilio; inosilicatos, donde los tetraedros se unen formando largas cadenas de tipo piroxenos de cadena simple como la augita, o tipo anfíboles de cadena doble como la hornblenda; y filosilicatos que son cadenas unidas sucesivamente en disposición laminar, donde se encuentran las micas como la muscovita y la biotita; y finalmente los tectosilicatos, que corresponden a estructuras tridimensionales como las ortoclasas y las plagioclasas (Conti 2007).

Elizalde (2002) planteó que los distintos minerales siguen un orden en cuanto a su alterabilidad según su estructura y menciona que Goldich en 1938, planteó una serie de alterabilidad para los minerales primarios, en la que los minerales ferromagnesianos son de alta alterabilidad como el olivino y los piroxenos, mientras que los minerales de menor alterabilidad son la hornblenda y la mica biotita; los feldespatos o plagioclasas son de baja estabilidad, por lo que son más alterables los ricos en calcio y los feldespatos ricos en sodio son menos alterables; los feldespato más resistentes a la alteración son los feldespatos potásicos (ortoclasas); por último se encuentran la mica moscovita y el cuarzo como los minerales menos alterables y más estables. En términos de alteración también se toma en cuenta la serie de cristalización de los minerales de Bowen de 1928 (González 2017), donde la temperatura en la litosfera es la que influye en el proceso de cristalización; iniciando a temperaturas altas y siguiendo con los minerales ferromagnesianos, tales como olivino, piroxeno, anfíbole y biotita; seguidos por las plagioclasas, iniciado con la anortita rica en calcio y finalizando la albita rica en sodio; los tres últimos son los feldespatos potásicos u ortoclasas, la mica moscovita y el cuarzo.

Al considerar lo propuesto por Bowen (1928) y Goldich (1938) se puede concluir que los minerales que cristalizan primero corresponden a los minerales más alterables y por lo tanto menos estables, como el olivino; y que los últimos minerales en formarse, como la moscovita y el cuarzo, son los menos alterables y más resistentes, esto relacionado con la complejidad de su estructura cristalina (González 2017). Los minerales de las rocas silicatadas son atacados por el agua, oxígeno y dióxido de carbono en condiciones de epigénesis; el agua

penetra en microfisuras y poros disolviendo los componentes más solubles. Las reacciones entre el residuo, el agua, el oxígeno, el CO₂ y los iones disueltos forman nuevos silicatos naturales: las arcillas; la presencia y formación de arcillas en suelos y sedimentos se debe a procesos de herencia, transformación y neoformación (Imbellone *et al.* 2017). Los minerales primarios son aquellos que forman las rocas, algunos son tan persistentes que permanecen inalterables en el tiempo, predominan en las fracciones arena y limo (2000 µm-50 µm; 50 µm-2 µm), son pobres en nutrientes y forman el esqueleto del suelo (Conti 2007).

Principios de formación de los minerales secundarios o minerales de arcilla

La determinación del origen de los minerales arcillosos es uno de los aspectos más interesantes de la mineralogía de arcillas, ya que estos minerales se encuentran en una gama bastante limitada de condiciones geológicas, como lo son los horizontes del suelo, sedimentos continentales y marinos, depósitos volcánicos y formaciones rocosas erosionadas; formándose debido al contacto de las rocas con agua, aire o vapor (Al-Ani y Sarapää 2008).

Inicialmente, la formación de los minerales de arcilla a partir de los minerales primarios ocurre debido a dos procesos muy importantes: la meteorización y la diagénesis. La meteorización de las rocas y el suelo es la principal fuente de formación de los minerales arcillosos; este proceso implica la desagregación física y la descomposición química de las rocas, las cuales luego se transforman en minerales arcillosos; la meteorización es un proceso que puede estar ocurriendo en distintas fases, por lo que se pueden encontrar muchas etapas de degradación para una misma arcilla. Los factores que gobiernan la meteorización de las rocas y la formación del suelo incluyen el tipo de roca parental, la proporción de agua/roca, la temperatura, la presencia de organismos y material orgánico, así como el tiempo que tarde este proceso (Foley 1999). Durante la meteorización ocurren cambios como la desaparición parcial o completa de los minerales originales, con el posible reemplazo de minerales secundarios; provocando un nuevo estado de equilibrio entre el material alterado y el ambiente supergénico, se producen a la vez cambios texturales, estructurales, geoquímicos y mineralógicos en los materiales expuestos; por ello, la meteorización involucra todos los procesos responsables del nuevo estado de equilibrio de las rocas y de los minerales con el

ambiente en que se encuentran, ya sea en o cerca de la superficie terrestre (Imbellone *et al.* 2017). La diagénesis es la alteración *in situ* de un mineral a formas más estables, excluye la alteración superficial (meteorización); la diagénesis ocurre, por ejemplo, cuando los minerales estables en un ambiente deposicional se exponen a otro por entierro y compactación. Los materiales de silicatos comunes como el cuarzo, el feldespato y los vidrios volcánicos, así como los carbonatos, los óxidos de hierro no cristalinos y los minerales arcillosos primarios, se transforman durante la diagénesis en minerales arcillosos más estables principalmente por disolución y recristalización (Foley 1999).

Por otra parte, se considera que la presencia y formación de arcillas en los suelos se debe a procesos de herencia, transformación y neoformación (González-Bonorino 1966). Por herencia se refiere a la acumulación detrítica de minerales de arcilla previamente formados sin ninguna modificación; por transformación, cuando ocurre alteración de los minerales de arcilla previamente formados debido a cambios geoquímicos en su ambiente; así se puede lograr por aporte o eliminación de elementos nuevos en el mismo lugar donde se produce la alteración del mineral primario; la neoformación es la cristalización *in situ* de minerales de arcilla a partir de iones presentes en el ambiente, este proceso ocurre cuando las soluciones migran a través del suelo y sedimentos en ambientes meteorizantes (Imbellone *et al.* 2017).

Las arcillas se componen de partículas microcristalinas de un grupo de minerales (Sirivitmaitrie *et al.* 2008), generalmente son materiales naturales compuestos de minerales de grano fino, muestran plasticidad cuando se mezclan con la cantidad adecuada de humedad y se endurecen cuando se secan (Sirivitmaitrie *et al.* 2011); las principales características de la arcillas según Das (2015) son un tamaño de partícula pequeño ($< 2 \mu\text{m}$), carga neta negativa y muestran plasticidad cuando se mezclan con agua (Firoozi *et al.* 2016). Los minerales secundarios que predominan en la fracción arcilla son la anatasa, gibbsita, hematita y goethita, caolinita, clorita pedogenética, esmectita, vermiculita, illita, haloisita, sepiolita y palygorskita, alofano, imogolita, entre otras; mientras que en otras granulometrías se pueden encontrar calcitas, yeso, piritita y halita (Imbellone *et al.* 2017).

Los procesos de transformación y neoformación de minerales arcillosos en zonas de cizallamiento permiten distinguir tres etapas sucesivas de alteración de los minerales en términos de formación de arcilla, como lo son la caolinización, illitización y montmorillonitización, impulsados por la energía química de transferencias de solución a bajas temperaturas (Riedmüller 1978). La caolinita se encuentra en la mayoría de las zonas de intemperismo y perfiles de suelo; las montmorillonitas, que son químicamente más complejas que las caolinitas, comunes en las partes inferiores de los perfiles de intemperismo, cerca de la roca, donde la química ejerce un fuerte control sobre la mineralogía; minerales arcillosos complejos como las illitesmectitas, son abundantes en los conjuntos de arcillas que se desarrollan a partir de rocas precursoras que contienen mica (Foley 1999).

Otros minerales de arcilla como la gibbsita, se forman a partir de alúmina en medios extremadamente desaturados en sílice ($< 1 \text{ ppm SiO}_2$); la montmorillonita y otras esmectitas se forman con presencia de aluminio, hierro y magnesio en medios ligeramente alcalinos, por la combinación de silicio, hierro y magnesio con aluminio autóctono; la atapulgita y la sepiolita, que son minerales de arcilla magnésicos, se forman en costras calcáreas de regiones semiáridas; y los silicatos de sodio, como la analcima, la magadiita y lamordenita, se forman en tierras bajas áridas; la vermiculita, illita, esmectita y sesquióxidos se forman a partir de la biotita, a través de procesos de degradación, que es la remoción de iones de la estructura cristalina de la arcilla y, procesos de agradación, que es la adición de iones a la estructura de la arcilla (Imbellone *et al.* 2017).

Minerales secundarios del suelo

La estructura y composición de los principales minerales arcillosos, es decir, caolines, esmectitas, vermiculita, illita, clorita y palygorskita-sepiolita, son muy diferentes a pesar de que están compuestas por capas octaédricas y tetraédricas como bloques de construcción básicos; el arreglo y la composición de las capas octaédricas y tetraédricas son responsables de la mayoría de las propiedades físicas y químicas (Al-Ani y Sarapää 2008).

Como ya se ha mencionado, la estructura básica de los filosilicatos son tetraedros de silicio, estos tetraedros se unen compartiendo oxígenos con otros tetraedros formando capas;

además, el silicio puede ser sustituido por Al^{3+} o Fe^{3+} dando lugar a la formación de capas octaedros; de esta manera, los filosilicatos pueden estar formados: por dos capas, una tetraédrica junto con una octaédrica, denominados filosilicatos bilaminares o 1:1; o bien por una capa octaédrica y dos tetraédricas, denominados filosilicatos trilaminares o 2:1 (Blanco 2010).

Los filosilicatos bilaminares son aquellos que están formados por dos capas, una de tetraedros de silicio y una capa octaédrica que puede tener como ión predominante el aluminio o el magnesio y están rodeados de oxígeno o de hidróxilos; cuando el ión dominante es aluminio se forma una capa dioctaédrica y cuando el ión dominante es magnesio se dice que la capa es trioctaédrica (Espitia *et al.* 2003). Dentro de los filosilicatos bilaminares se encuentra el grupo de las kanditas, que son los minerales arcillosos dominantes en el suelo siendo los más importantes la caolinita y la halloysita; y el grupo de las serpentinas que incluye minerales trioctaédricos conocidos como el crisotilo, la lizardita, la antigorita y la bertierina (Besoain 1985).

La caolinita es el principal mineral arcilloso de los oxisoles, ultisoles y otros suelos, tiene una capacidad de intercambio catiónico (CIC) menor de 10 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, es característica del horizonte óxico para los oxisoles en la taxonomía de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Soil Survey Staff 1999) y presenta un área superficial específica entre 10 y 20 m^2/g (Firoozi *et al.* 2016). Los minerales resistentes a la intemperie en los oxisoles son muy limitados, por lo que estos suelos son considerados los altamente degradados, siendo la caolinita el material más degradado que se puede encontrar en el suelo (Nanzyo y Kanno 2018). La halloysita es otro de los principales minerales de tipo 1:1, se encuentra en muchos suelos como un componente en mayor o menor proporción de la fracción arcillosa; se puede encontrar en Andisoles de climas semisecos y en los horizontes subyacentes de andisoles en clima húmedo, se origina a partir de cenizas volcánicas en sitios con mal drenaje y también se puede desarrollar en entornos geoquímicos cambiantes causados por la alternancia entre de las estaciones seca y lluviosa (Al-Ani y Sarapää 2008). La CIC de la halloysita es de 40 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, y algunas halloysitas muestran una alta selectividad por K^+ y NH_4 (Nanzyo y Kanno 2018).

Los filosilicatos trilaminares presentan dos capas de tetraedros de sílice que encierran una capa de octaedros, ya sea de aluminio o de magnesio, estas arcillas no son eléctricamente neutras debido a que presentan sustituciones de iones por otros de carga distinta (Al-Ani y Sarapää 2008); dentro de los filosilicatos trilaminares se encuentra la familia de las esmectitas o minerales expandibles, donde se incluyen especies dioctaédricas como la montmorillonita, la nontronita y la beidelita, y trioctaédricas como la saponita, la sauconita y la hectorita; en general estas arcillas presentan estructuras que permiten que el agua penetre entre las capas tetraédricas y octaédricas a través de los enlaces de hidrógeno, lo que les da la propiedad de expandirse en presencia de agua y contraerse en su ausencia (Espitia *et al.* 2003).

Las esmectitas muestran altas CIC, que varía entre 90 y 150 cmol(+)/kg, poseen una superficie específica que puede variar de 50 a 120 m/g² y por lo general se encuentran en suelos de pH neutro que suelen ser fértiles ya que estos minerales pueden aportar gran cantidad de nutrientes (Nanzyo y Kanno 2018). Según Al-Ani y Sarapää (2008), el mineral de esmectita más común es la montmorillonita, los suelos donde abunda esta arcilla muestran un ciclo intensivo de contracción-expansión cuando se alterna una estación seca con una estación húmeda. En la estación seca, se forman grietas anchas desde la superficie del suelo hasta una profundidad de varias decenas de centímetros o más. Las grietas pueden desarrollarse horizontal, vertical o diagonalmente, al comenzar la temporada de lluvias, el agua ingresa a los horizontes inferiores del suelo a lo largo de las grietas y comienza la hinchazón en todos los sitios que tienen humedad, la fuerza de hinchamiento en el horizonte inferior puede levantar el suelo superior y el horizonte del suelo puede ondularse, estas son las propiedades de los vertisoles, que ocupan alrededor del 3 % del suelo del mundo (Nanzyo y Kanno 2018).

La familia de las micas, las cuales poseen el mismo esquema de cristalización de las esmectitas, pero a diferencia de estas, no son minerales expandibles, debido a que el tamaño, la carga y el número de coordinación de K es tal que encaja perfectamente en el anillo hexagonal de oxígenos del tetraedro de silicio adyacente, esto le da a la estructura un fuerte enlace iónico entrelazado que sostiene las capas individuales juntas, evitando que las moléculas de agua ocupen la posición de la capa intermedia como lo hace en las esmectitas

(Al-Ani y Sarapää 2008). Los ejemplos de arcillas más importantes de esta familia son la illita, la vermiculita y la moscovita (Espitia *et al.* 2003).

La configuración de la unidad básica de la illita es similar a la montmorillonita; sin embargo, las capas están unidas por iones de K, la CIC de la illita varía de 10 a 40 cmol(+)/kg (Firoozi *et al.* 2016). Las illitas son los minerales dominantes en sitios derivados de rocas arcillosas formados por la meteorización de silicatos (principalmente feldespato) por medio de la alteración de los materiales arcillosos y durante la degradación de la moscovita (Deer *et al.* 1975). La formación de illita generalmente se ve favorecida en condiciones alcalinas y por la alta concentración de Al y K (Al-Ani y Sarapää 2008). La vermiculita que posee una importante cantidad de magnesio, presenta una CIC alta pudiendo estar entre los 110 y 180 cmol(+)/kg (Áviles *et al.* 1993); se forma por la hidratación de mica (biotita y flogopita) por acción de meteorización o por alteración hidrotermal (Grim 1968), donde se da un intercambio de cationes dentro de las capas cristalinas seguido por la introducción de moléculas de agua en el espacio entre capas (Bergaya y Lagaly 2006), los iones de K⁺ de la mica por cationes como Mg²⁺, o por una combinación de iones Mg²⁺ y Ca²⁺ (Rodríguez 2018). La moscovita es conocida comúnmente como mica potásica, pero también puede llevar Mg u otros elementos; su origen es magmático y metamórfico, por lo que aparece en rocas ígneas ácidas, en rocas metamórficas y como mineral heredado en rocas sedimentarias; se caracteriza por su exfoliación en láminas finas y flexibles, y se diferencia de otras micas por su color plateado tenue incolora (Ibáñez *et al.* 2011).

Finalmente, el grupo de las cloritas, que son minerales compuestos por dos capas tetraédricas y dos capas octaédricas por lo que se les denomina 2:1:1; no son minerales eléctricamente neutros debido a sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga, pero de tamaño semejante en sus capas; dentro de las cloritas se encuentran los conocidos como minerales fibrosos como la sepiolita y la paligorskita (Espitia *et al.* 2003). La sepiolita y la paligorskita tienen morfologías fibrosas o en forma de listón, pero la paligorskita exhibe más diversidad estructural y, aunque ambos minerales son silicatos de Mg, la paligorskita tiene menos Mg y más Al que sepiolita (Moore y Reynolds 1997). Estructuralmente estos minerales constan de bloques y canales en forma de cinta; cada unidad estructural está formada por dos capas de

tetraedro de silicio y una capa central trioctaédrica. En la capa octaédrica los iones Mg^{2+} ocupan dos posiciones diferentes; en los bordes de los bloques estructurales, coordinados con moléculas de agua; y en el interior de los bloques, vinculados a grupos hidroxilo (Al-Ani y Sarapää 2008).

De todo lo anterior se puede concluir que las arcillas del suelo forman diferentes capas o arreglos estructurales, que, junto con la presencia de uno u otros cationes dentro de la estructura, producen una amplia diversidad de arcillas con gran variedad de propiedades que dan un comportamiento característico al suelo donde se encuentren (Alvarado *et al.* 2014). Además, estos minerales pueden presentar capas mixtas o interestratificadas, caracterizadas mediante una secuencia de apilamiento vertical de dos o más tipos de capas individuales, formadas por meteorización, diagénesis, por procesos hidrotermales, entre otros; los más comunes de minerales arcillosos de capa mixta son las mezclas de vermiculita, clorita, illita y vermiculita (Al-Ani y Sarapää 2008).

Técnicas para la identificación de arcillas

La mineralogía de suelos es una rama de las ciencias geológicas, la cual permite conocer y comprender de la evolución de la fase sólida inorgánica que componen los suelos, de modo que sus principios se aplican para la identificación, descripción, clasificación e interpretación de las características y propiedades de los diferentes componentes mineralógicos que se pueden encontrar en un suelo (Imbellone *et al.* 2017).

Los minerales de granulometría fina tales como las arcillas, son prácticamente imposibles de identificar macroscópicamente, por lo que recurren a diferentes técnicas para su estudio (Salgado de la Parra 2019); entre ellos, la absorción de infrarrojos, que tiene una utilidad limitada pero a medida que se han adquirido conocimientos en este campo, se está convirtiendo en un complemento importante para otras pruebas; el microscopio electrónico es una herramienta poderosa para la mineralogía de arcillas; sin embargo, implica una función muy especial y requiere equipo costoso; el análisis térmico diferencial revela información sobre el comportamiento de los minerales arcillosos, pero no siempre, permite su identificación (Al-Ani y Sarapää 2008).

La técnica más utilizada a nivel mundial es la difracción de rayos X, la cual corresponde a un método analítico no destructivo, rápido y eficaz para la identificación y cuantificación de estos minerales; se basa en la interacción entre los rayos X y la estructura cristalina que forman las capas que dan forma a las arcillas (Lindholm 1987). Los rayos X corresponden a ondas de radiación electromagnética de aproximadamente 1 \AA , y que tiene un comportamiento como onda y como partícula, al ser emitidos y al impactar en los átomos de una estructura cristalina de las arcillas, provocan una dispersión específica para cada mineral de arcilla (Salgado de la Parra 2019).

Los difractómetros de rayos X utilizan la Ley de Bragg para el cálculo del espaciamiento entre las capas de tetraedros y octaedros, así como para el cálculo del índice de cristalinidad de los polímeros, tomando en cuenta longitud de onda de los rayos X, la distancia entre los planos de la red cristalina y el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión (Blanco 2010); así la relación entre el ángulo de incidencia de los rayos X y la distancia entre dos planos de los cristales de las arcillas, permite identificar cada uno de los distintos minerales que se pueden encontrar en los suelos (Espitia *et al.* 2003); ya que cada sólido cristalino tiene su patrón de polvo de rayos X característico y que es utilizado a modo de huella dactilar para su identificación (Al-Ani y Sarapää 2008).

Para analizar una muestra de suelo por esta técnica; primero, se inicia con la eliminación de la fracción de arena con un tamiz ($> 53 \mu\text{m}$) en húmedo; luego, por sedimentación y según la Ley de Stokes, se separa la arcilla del limo en un tubo de sedimentación con agua y un defloculante de partículas (hexametáfosfato de sodio $0,0005 \text{ mol/L}$) (Al-Ani y Sarapää 2008); la fracción limo y la fracción arcilla también se pueden separar por centrifugación a 700 rpm por tres minutos usando la ley de Stock modificada (Shirozu 1988). La fracción de arcilla extraída se recoge y luego se le realizan lavados con agua para eliminar el dispersante, se seca en un horno a no más de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ y finalmente se pulveriza en un mortero para ser analizadas en el difractómetro de rayos X (Al-Ani y Sarapää 2008).

Los resultados de los difractogramas permiten diferenciar especies y grupos de los minerales de cristalinos, los cuales se pueden identificar con mayor seguridad complementando la

información obtenida con análisis químicos, térmicos, petrográficos y de microscopía electrónica (Espitia *et al.* 2003). En estudios edafológicos, es de suma importancia considera las arcillas debido a su gran influencia sobre las propiedades físicoquímicas y biológicas de los suelos (Alvarado *et al.* 2014). Con la identificación de los distintos minerales es posible conocer la reserva de minerales de un suelo, y con ello, establecer de mejor manera la aptitud que éste posee; además, su aptitud potencial en función de los distintos agentes naturales a través del tiempo (Nanzyo y Kanno 2018).

El objetivo de este capítulo es identificar la mineralogía de las arcillas de los 22 perfiles de suelos estudiados en este trabajo, determinar clase de tamaño de partícula y la clase de temperatura del suelo de estos perfiles, con el fin de clasificar a nivel de familia mineralógica los perfiles analizados, según la Clave para la Taxonomía de Suelos en su décimo tercera edición del año 2022 (Soil Survey Staff 2022).

Metodología

Área de estudio

Los 22 perfiles de suelo a clasificar se distribuyen en los distritos Volcán, Brunka y Buenos Aires del Cantón Buenos Aires y parte del distrito San Pedro de Pérez Zeledón. Esta zona presenta una estación seca que inicia a finales de diciembre y termina alrededor de abril, siendo febrero el mes más seco, y octubre el mes más lluvioso (INDER 2014).

Trabajo de campo

La ubicación de los perfiles se determinó considerando los abanicos aluviales y materiales descritos por Obando y Kussmaul (2009) en el mapa geológico de la hoja Buenos Aires. Para la descripción detallada de los perfiles de los suelos se realizaron calicatas, las cuales son fosas de observación de 1,5 m de ancho por 2,0 m de largo y 2,0 m de profundidad o hasta la profundidad que lo permita el suelo. Se identificaron los horizontes genéticos del perfil del suelo y se caracterizó según su textura, color, entre otras características del sitio utilizando el Field Book for Describing and Sampling Soils (Schoeneberger *et al.* 2012), y se tomaron muestras de cada uno de los horizontes para análisis de laboratorio.

Clasificación taxonómica

Con los datos de los análisis de laboratorio, tanto físicos como químicos, y las características morfológicas de los perfiles, se utilizó la Clave para la Taxonomía de Suelos en su décimo tercera edición (Soil Survey Staff 2022), partiendo de la definición de los horizontes diagnóstico, para con ellos establecer el orden. Y se siguieron los criterios y parámetros establecidos en la taxonomía de suelos, para continuar con la definición del suborden, el gran grupo y el subgrupo. Para continuar con la clasificación a nivel de familia mineralógica, se procedió a determinar tres parámetros establecidos en la taxonomía: tamaño de partícula, clase de mineralogía y régimen de temperatura del suelo, en la sección control determinada para cada perfil.

Sección de control: La sección de control para la definición del tamaño de partícula y la toma de muestra para mineralogía, se establece según estos parámetros de la taxonomía de suelos. Para suelos minerales que tienen una capa restrictiva para el crecimiento de raíces, dentro de los 36 cm de la superficie del suelo mineral o abajo del límite superior de materiales orgánicos de suelo con propiedades ándicas, cualquiera que esté más superficial. Para aquellos Alfisoles, Ultisoles y grandes grupos de Aridisoles y Mollisoles, que están en subgrupos Lamellic o tienen un horizonte argílico, kándico o nátrico, que tiene su límite superior dentro de los 100 cm o más de la superficie del suelo mineral y que no están en un subgrupo Grossarenic o Arenic: entre el límite inferior de un horizonte Ap o a una profundidad de 25 cm de la superficie del suelo mineral, cualquiera que esté más profundo, y 100 cm debajo de la superficie del suelo mineral o a la capa restrictiva a las raíces, cualquiera que sea más somera (Soil Survey Staff 2022). Para cada uno de los perfiles, se tomó como muestra para tamaño de partícula y para mineralogía, el horizonte ubicado dentro de la sección control.

Tamaño de partícula: Se utiliza para caracterizar la composición del tamaño de las partículas del suelo, incluyendo la tierra-fina y los fragmentos de roca, excluyendo materia orgánica y sales más solubles que el yeso. Las clases de tamaño de partícula de la taxonomía representan un compromiso entre las divisiones convencionales de las clasificaciones pedológicas e ingenieriles, usando un diámetro de 50 micras (50 μm) para establecer el límite entre arena y limo (Soil Survey Staff 2022).

Clase de mineralogía: La composición mineralógica de la fracción arcilla ($< 2 \mu\text{m}$) se determina por difracción de rayos X. La mineralogía de suelos es útil para hacer predicciones del comportamiento del suelo y su respuesta al manejo (Soil Survey Staff 2022).

Régimen de temperatura del suelo: La sección de control para la temperatura del suelo está a una profundidad de 50 cm debajo de la superficie del suelo, o en su límite superior si hay presencia de una capa restrictiva. La escala Celsius (centígrados) es la estándar para la temperatura del suelo y se asume que el suelo no está bajo riego. Las clases de temperatura del suelo, utilizadas por la taxonomía, están definidas en términos de la temperatura media anual del suelo (diferencia entre las temperaturas medias del verano y del invierno) (Soil Survey Staff 2022).

Trabajo de laboratorio

Separación de arcillas

La metodología empleada para la preparación de las muestras de arcilla y su correspondiente análisis mineralógico, bajo la técnica de difracción de rayos X en polvos, se adaptó del método de Carter (1993). Es así, como para cada perfil, se tomó muestra de suelo dentro de la sección control. Se tomaron 50 g de suelo seco (secado al horno $60 \text{ }^\circ\text{C}$) y tamizado con una criba de 2 mm, se les destruyó la materia orgánica (MO) con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) a una concentración del 30 %. Se pusieron 40 g de la muestra tratada con H_2O_2 en botellas de agitación y se les agregó 100 ml de Calgón (37,5 g de hexametáfosfato de sodio + 7,1 g de carbonato de sodio para 1000 ml de Calgón) y 100 ml de agua y se dejaron agitando por 16 horas en un agitador horizontal. A las muestras de suelo analizadas, no se les destruyeron los carbonatos porque no se encontraron suelos con contenido de calizas, ni tampoco se le destruyeron los sesquióxidos por contemplarse estos últimos como parte de las arcillas.

El contenido de las botellas de agitación se trasvasó a probetas de 1000 ml de capacidad, pasado previamente el contenido a través de una criba de 50 micras ($50 \mu\text{m}$) para separar físicamente la fracción arena de las fracciones arcilla y limo según el método de la sedimentación basado en la ley de Stokes. La suspensión de arcilla con limo se aforó a 1000 ml, se agitó por 30 segundos y se dejó reposar por dos horas, tiempo necesario para la

deposición de la fracción limo en el fondo de la probeta, quedando la arcilla en suspensión. Empleando una manguera y una pequeña bomba, se pasaron las arcillas en suspensión a un recipiente con de 1000 ml capacidad. Este paso se repitió dos veces más, volviendo a aforar la probeta, agitando por 30 segundos y dejando reposar por 2 horas.

A los recipientes con las arcillas en suspensión, se les agregó 50 ml de cloruro de magnesio (MgCl_2) 1,0 M (disolver 303,3 g de MgCl_2 en 1000 ml de agua destilada) de manera que quedaran precipitadas y saturadas de Mg. Después de dos días en reposo, se observó las arcillas precipitadas y un líquido sobrenadante (figura 4.1), el cual se decantó conservando las arcillas en el fondo del recipiente. Posteriormente, las arcillas fueron trasvasadas a tubos de centrifuga de 50 ml, y se centrifugaron por 30 minutos a 2400 rpm, se decantó el líquido, las arcillas se lavaron con agua y se volvieron a colocar en la centrífuga por 15 minutos. Luego de eliminar el agua, se agregaron 10 ml de acetona ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) a los tubos y se colocaron nuevamente en la centrífuga por 5 minutos. Pasado este tiempo, se eliminó la acetona y se colocaron los tubos con las arcillas en un horno a una temperatura de 60°C por 3 días. Las muestras de arcilla secas se pulverizaron en un mortero hasta obtener un polvo de arcilla.



Figura 4.1. Proceso de separación de arcillas, detalle precipitación de estas con la solución de cloruro de magnesio 1,0 M.

Difracción de rayos X

Los análisis de difracción de rayos X de las arcillas obtenidas fueron realizados en un difractómetro de rayos X de la marca Bruker modelo D8 ADVANCE ECO (figura 4.2), en

la Unidad de Difracción de Rayos X de la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica.

El análisis de difracción de los minerales presentes en las arcillas se realizó con la técnica de difracción de rayos X para polvos, se utilizó una fuente de $\text{Cu}\alpha_1\text{-}\alpha_2$ y una configuración Bragg Bentano con un detector lineal LYNXEYE XE-T. El equipo al ir analizando los resultados de las muestras compara esta información con patrones de difracción con la base de datos ICDD (Centro Internacional de Datos de Difracción), la Base de datos ICSD (Base de datos de estructuras cristalinas inorgánicas), además del software EVA de Brucker, como interfase de las bases de datos y visualización de los patrones de difracción siguiendo la metodología de Burt (2004). El software, como resultado del análisis de difracción, genera un patrón de los picos llamado difractograma, en el cual se muestran los minerales presentes en cada una de las muestras. Posteriormente se determina el porcentaje de cada uno de ellos en la fracción arcilla, con estos porcentajes se entra a la taxonomía de suelos, en el apartado de clases de mineralogía y se siguen los criterios para establecer la clase mineralógica de cada perfil modal.



Figura 4.2. Equipo Bruker modelo D8 ADVANCE ECO, en la Unidad de Difracción de Rayos X de la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica.

Resultados

Criterios de clasificación taxonómica

Clase de tamaño de partícula

De los 22 perfiles estudiados, 16 (P1, P2, P3, P4, P6, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P18, P19 y P21) tienen una clase de tamaño de partícula muy fina (*Very-fine*), ya que presentan 60 % o más (por peso) de arcilla en la muestra de la sección control; 3 perfiles (P7, P17 y P20) tienen una clase de tamaño de partícula fina (*Fine*), por que poseen menos de 60 % (por peso) de arcilla en la fracción de tierra-fina, esto según el triángulo textural para la definición del tamaño de partícula que se muestra en la Figura 4.3.

El perfil El Ángel Arriba (P5) tiene una clase de tamaño de partícula francosa-gruesa (*Coarse-loamy*), ya que en la fracción de tierra-fina, posee menos de 18 % de arcilla (por peso). La clase de tamaño de partícula para el perfil Santa María (P8) es esquelética-francosa (*Loamy-skeletal*), al presentar contenidos de fragmentos de roca de 2 mm de diámetro o más grandes, cohesivos y persistentes, de 35 % o más (por volumen), y menos de 35 % (por peso) de arcilla. El perfil Ujarrás (P22) tiene una clase de tamaño de partícula francosa-fina (*Fine-loamy*), debido a que posee de 18 a 35 % de arcilla (por peso) en la fracción de tierra-fina.

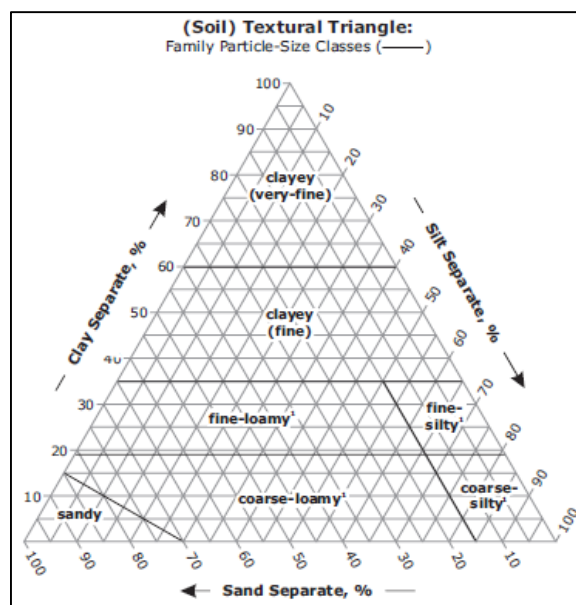


Figura 4.3. Triángulo textural para la definición del tamaño de partícula de Schoeneberger *et al.* (2012).

Cuadro 4.1. Clase de tamaño de partícula de los perfiles modales descritos, según los criterios de la taxonomía de suelos del USDA.

Perfil	Nombre	Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Arena (%)	Limo (%)	Clase de tamaño de partícula*
P1	San Juancito	Bt1	40-78	60	22	18	<i>Very-fine</i>
P2	Volcán	Bt2	50-70	71	21	8	<i>Very-fine</i>
P3	Peje	Bt1	36-89	75	6	19	<i>Very-fine</i>
P4	Llano Bonito	Bt	39-87	70	16	14	<i>Very-fine</i>
P5	El Ángel Arriba	A2	15-35	14	78	8	<i>Coarse-loamy</i>
P6	El Ángel	Bt2	40-70	60	12	28	<i>Very-fine</i>
P7	Guadalajara	Bt1	42-74	59	22	19	<i>Fine</i>
P8	Santa María	A	0-35	22	52	26	<i>Loamy-skeletal</i>
P9	Convento	Bt2	47-140	64	16	20	<i>Very-fine</i>
P10	Buenos Aires	Bt1	24-70	76	21	3	<i>Very-fine</i>
P11	Cordoncillo	Bt2	60-110	70	12	18	<i>Very-fine</i>
P12	Río Azul	Bt2	82-130	72	12	16	<i>Very-fine</i>
P13	Puente	Bt2	37-68	75	11	14	<i>Very-fine</i>
P14	Sabana La Pelona	Bt2	50-96	72	12	16	<i>Very-fine</i>
P15	Dúrika	Bt1	38-70	62	20	18	<i>Very-fine</i>
P16	Alto Guadalajara	2Bt1	40-68	75	17	8	<i>Very-fine</i>
P17	Río Cañas	Bt2	38-80	55	22	23	<i>Very-fine</i>
P18	Quebrada Palma	Bt1	30-98	76	10	14	<i>Very-fine</i>
P19	Cacao	Bt	30-92	70	25	5	<i>Very-fine</i>
P20	La Ceiba	Bt1	10-30	57	20	23	<i>Fine</i>
P21	Las Juntas	Bt1	10-43	77	12	11	<i>Very-fine</i>
P22	Ujarrás	A2	40-90	22	50	28	<i>Fine-loamy</i>

* La clase de tamaño de partícula se definió según la Clave para la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 2022) y el triángulo textural para clases de tamaño de partícula de Schoeneberger *et al.* (2012).

Clase de mineralogía

En las figuras 4.4 a la 4.25 se muestran los difractogramas de las acillas de las muestras de la sección control de los perfiles estudiados. Como se puede observar, los minerales dominantes en las muestras de la fracción arcilla de los perfiles analizados fueron: gibbsita (GI), goethita (GE), hematita (HE) y halloysita (KH); a excepción del perfil Santa María (P8), en los que aparte de gibbsita y halloysita, que en este caso no fueron mayoritarios, aparece una variedad de minerales que no se identificaron en las muestras de los demás perfiles, como montmorillonita (MT), tridimita (TD), aluminosilicato de sodio (AQ), ortoclasa (FR), dicktita (DK), ferrihidrita (FE) y nacrita (NC). Se encontraron otros minerales como cuarzo (QZ) y caolinita (KK). Es importante considerar que los perfiles clasificados como Oxisoles contaban con la presencia de un endopedón kándico con las propiedades de minerales intemperizables de un horizonte óxico dentro de los 100 cm de profundidad.

Posteriormente a la identificación de los minerales en la fracción arcilla de los perfiles estudiados, se procedió a determinar su porcentaje en esta fracción, mediante los difractogramas. Para esto se midió el pico más grande de cada mineral identificado en el análisis y según la escala del difractograma, se estimó el porcentaje de cada uno de los minerales en la muestra de arcilla.

Es así como se llegaron a identificar 4 clases de mineralogía para los perfiles estudiados. La primera es gibbsítica (*gibbsitic*) en P1, P4, P5, P17 y P19, debido a que este mineral estaba presente en más de un 40 % en la muestra de la fracción de tierra-fina. La segunda clase sésquica (*sesquic*), la presentan P2, P3, P9, P10, P12, P18 y P21, contiene de 18 a 40 % de óxido de hierro como Fe_2O_3 (hematita) y de 18 a 40 % de gibbsita en la fracción de tierra-fina. La tercera clase es alítica (*allitic*), cuando se presentó de un 18 a un 40 % de gibbsita en la fracción de tierra-fina, como ocurre en P6, P7, P11, P13 y P14. La cuarta clase de mineralogía es mezclada (*mixed*), que son todos los otros suelos en que no hay dominancia de un mineral o minerales sobre otros, como lo fue en las muestras de P8, P15, P16, P20 y P22. En la figura 4.26 se muestran los difractogramas agrupados en las 4 clases de mineralogía de arcillas halladas: gibbsítica (A), sésquica (B), alítica (C) y mezclada (D).

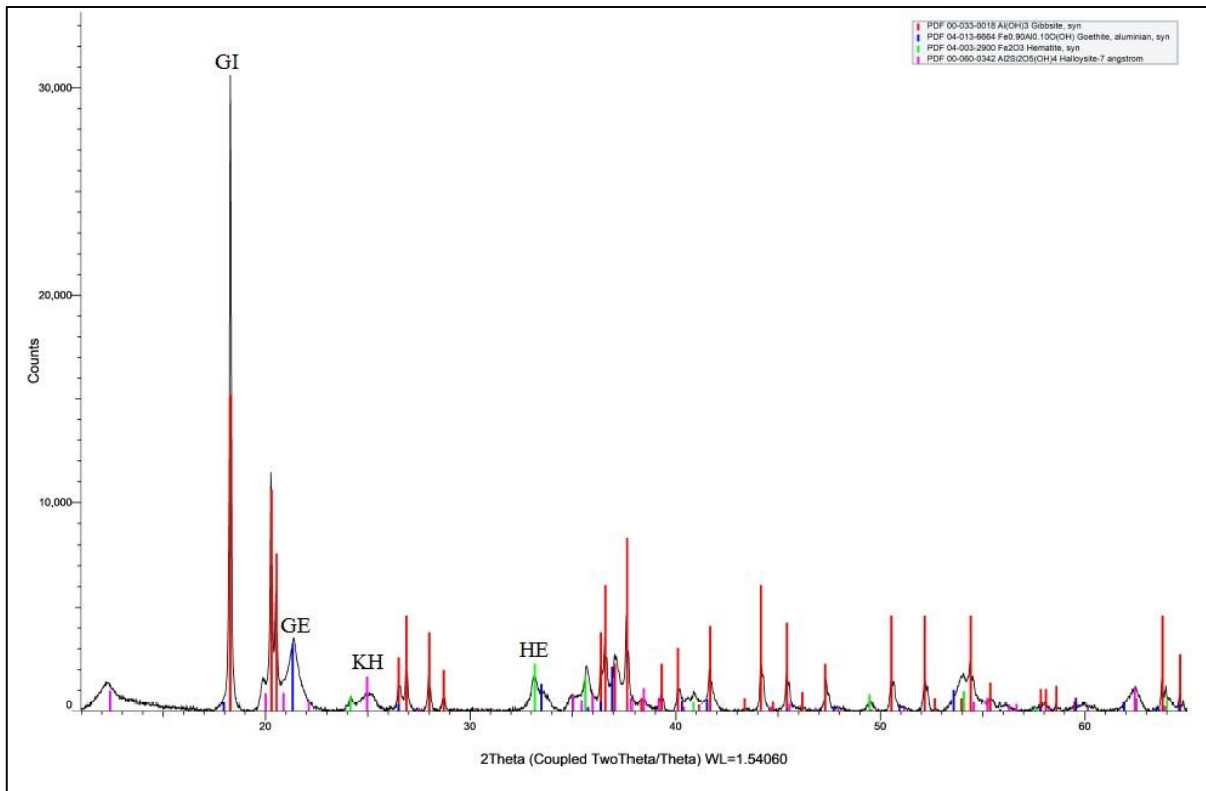


Figura 4.4. Difractograma de arcillas del perfil San Juancito (P1).

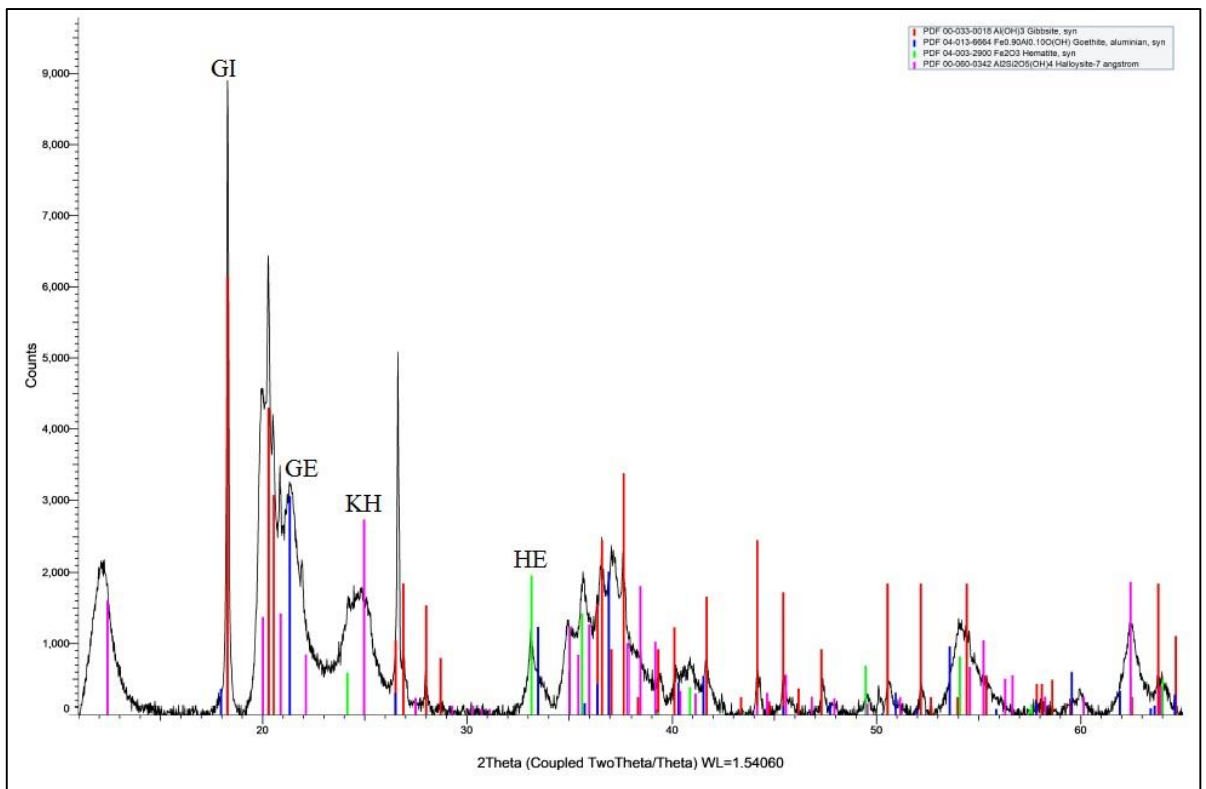


Figura 4.5. Difractograma de arcillas del perfil Volcán (P2).

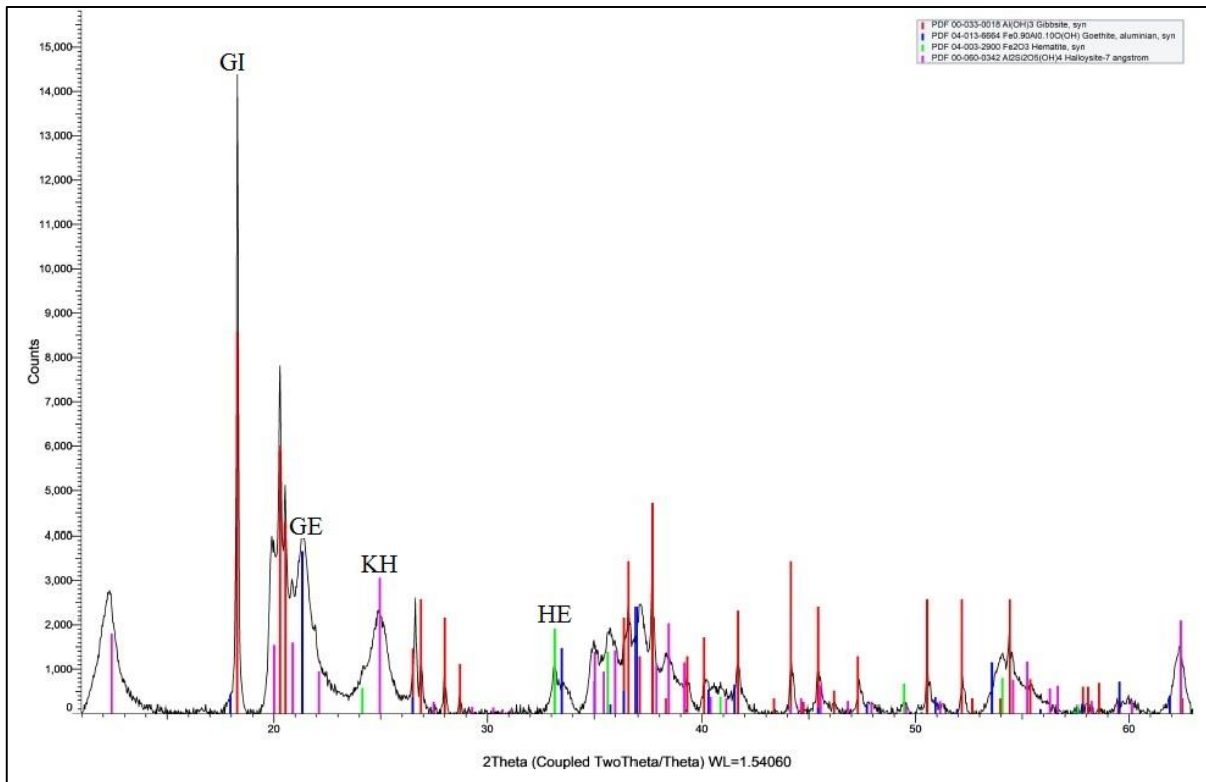


Figura 4.6. Difractograma de arcillas del perfil Peje (P3).

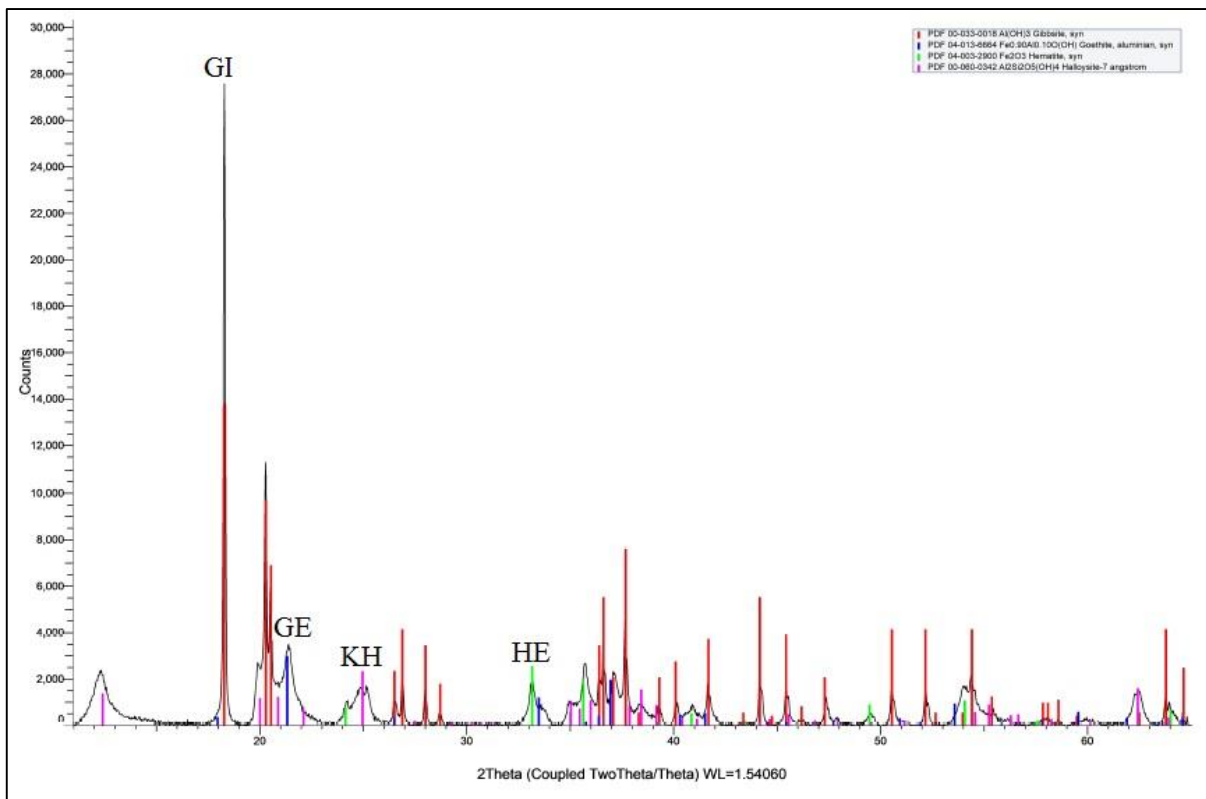


Figura 4.7. Difractograma de arcillas del perfil San Llano Bonito (P4).

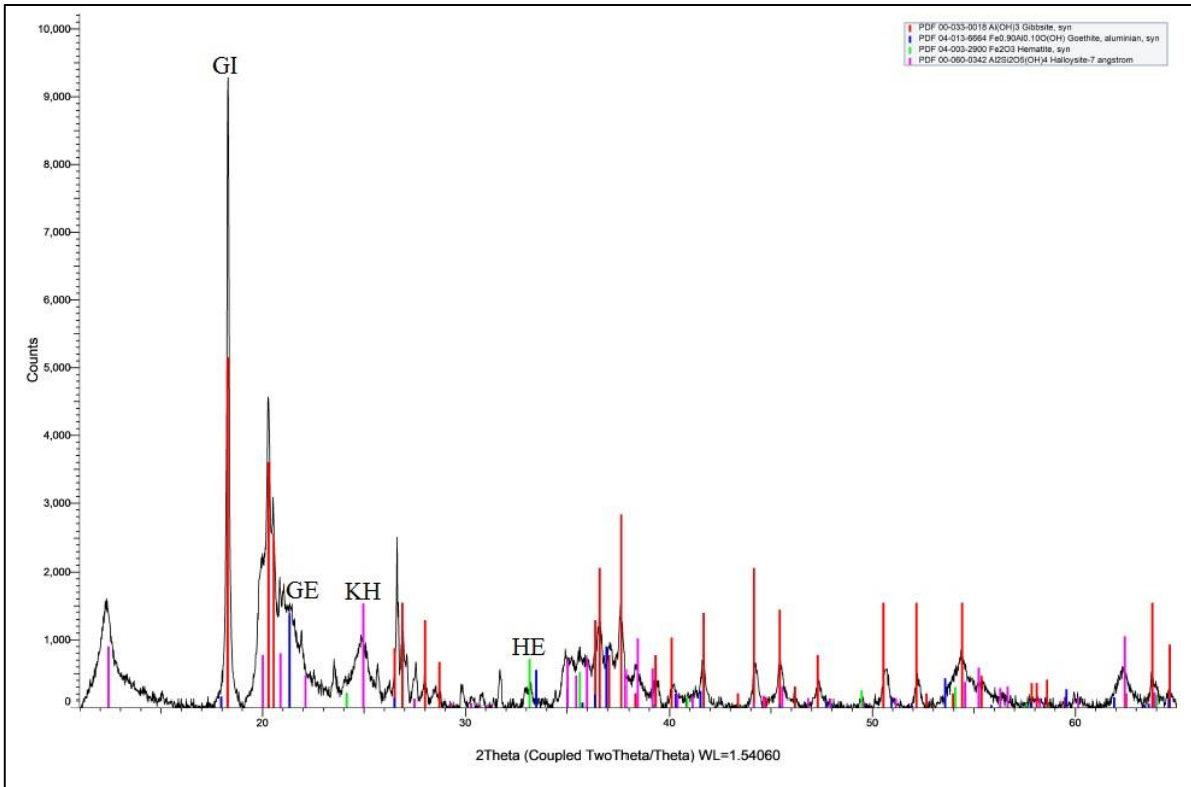


Figura 4.8. Difractograma de arcillas del perfil El Ángel Arriba (P5).

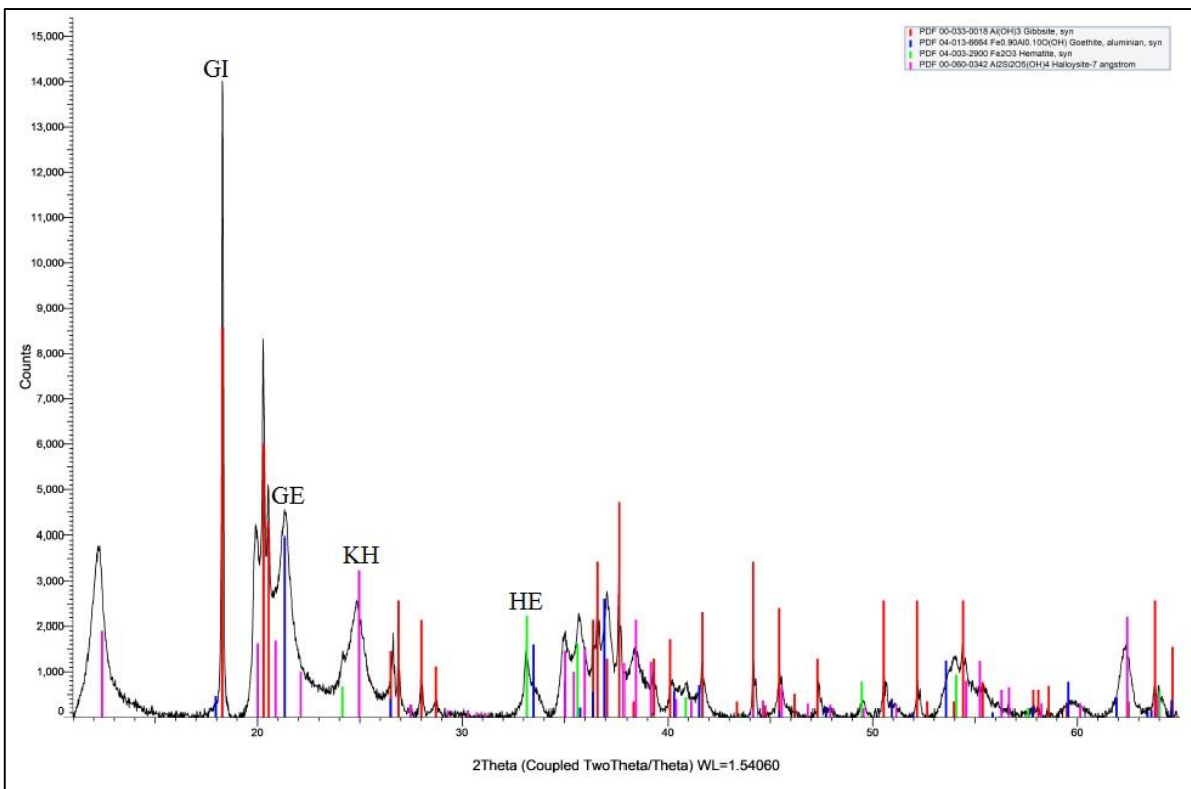


Figura 4.9. Difractograma de arcillas del perfil El Ángel (P6).

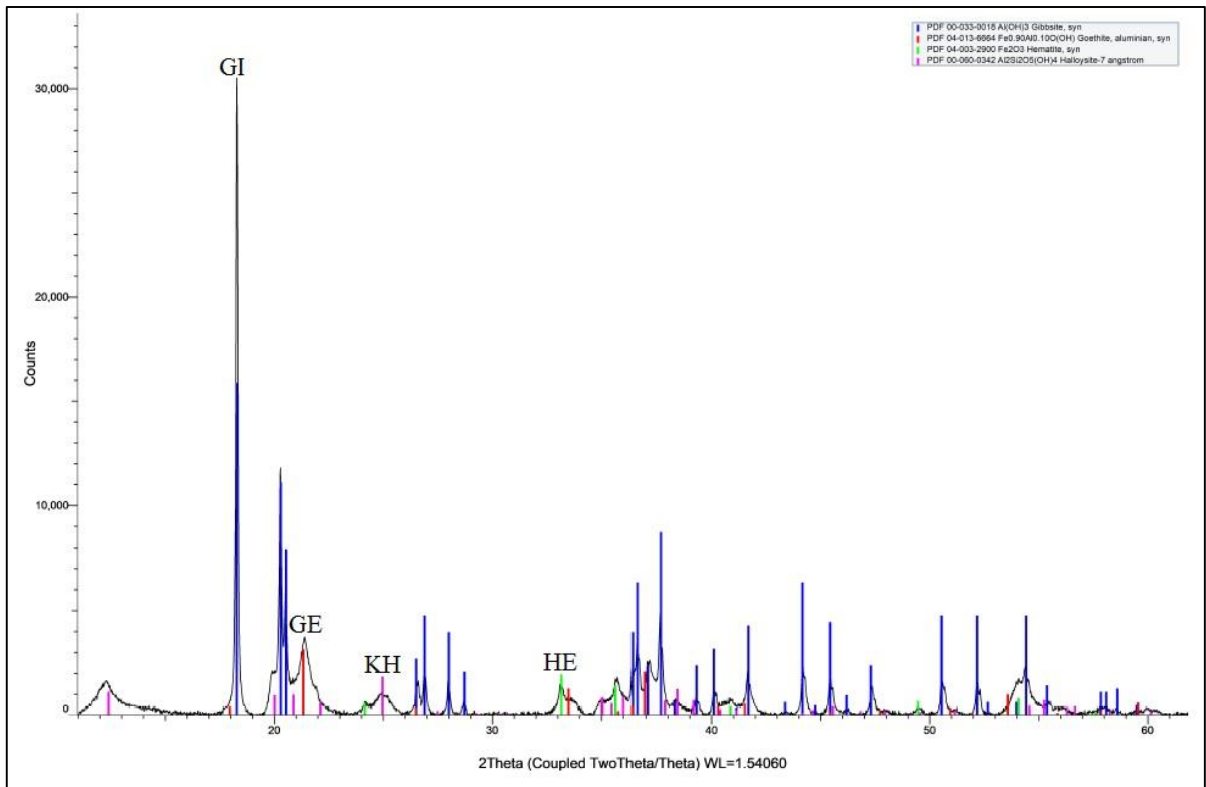


Figura 4.10. Difractograma de arcillas del perfil Guadalajara (P7).

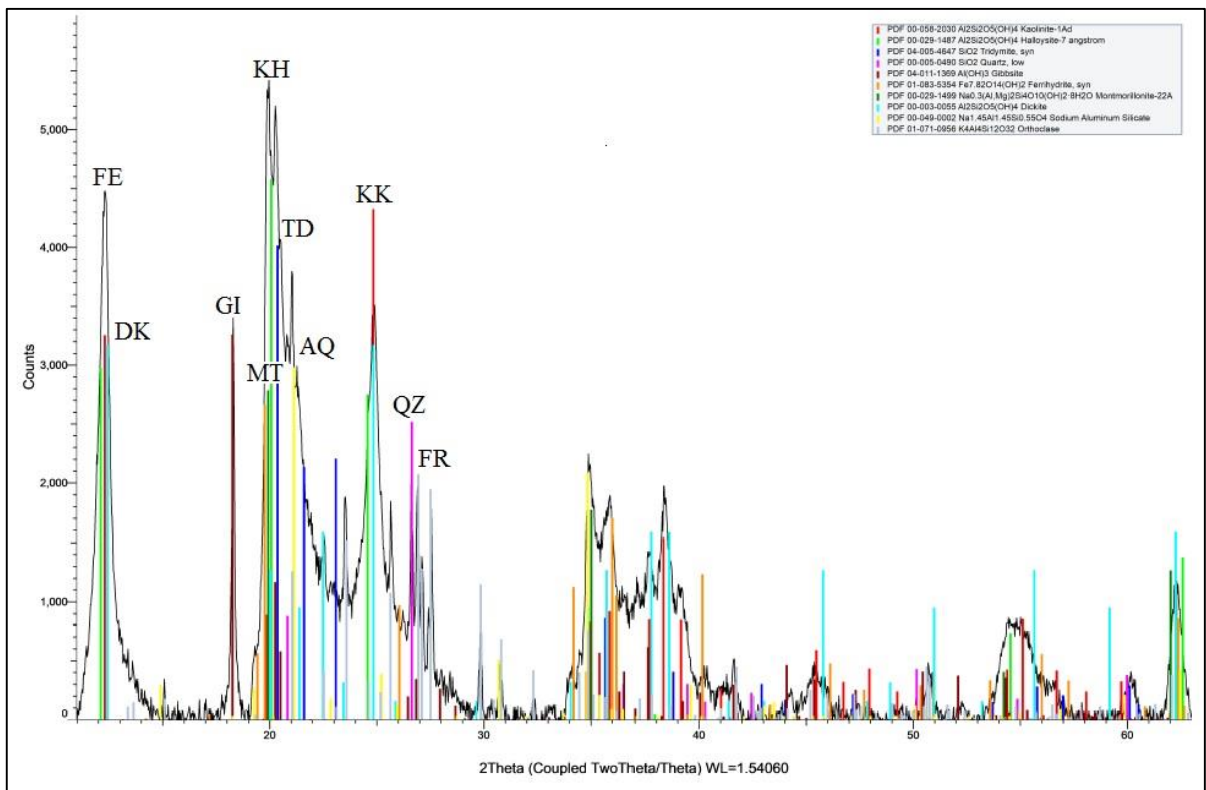


Figura 4.11. Difractograma de arcillas del perfil Santa María (P8).

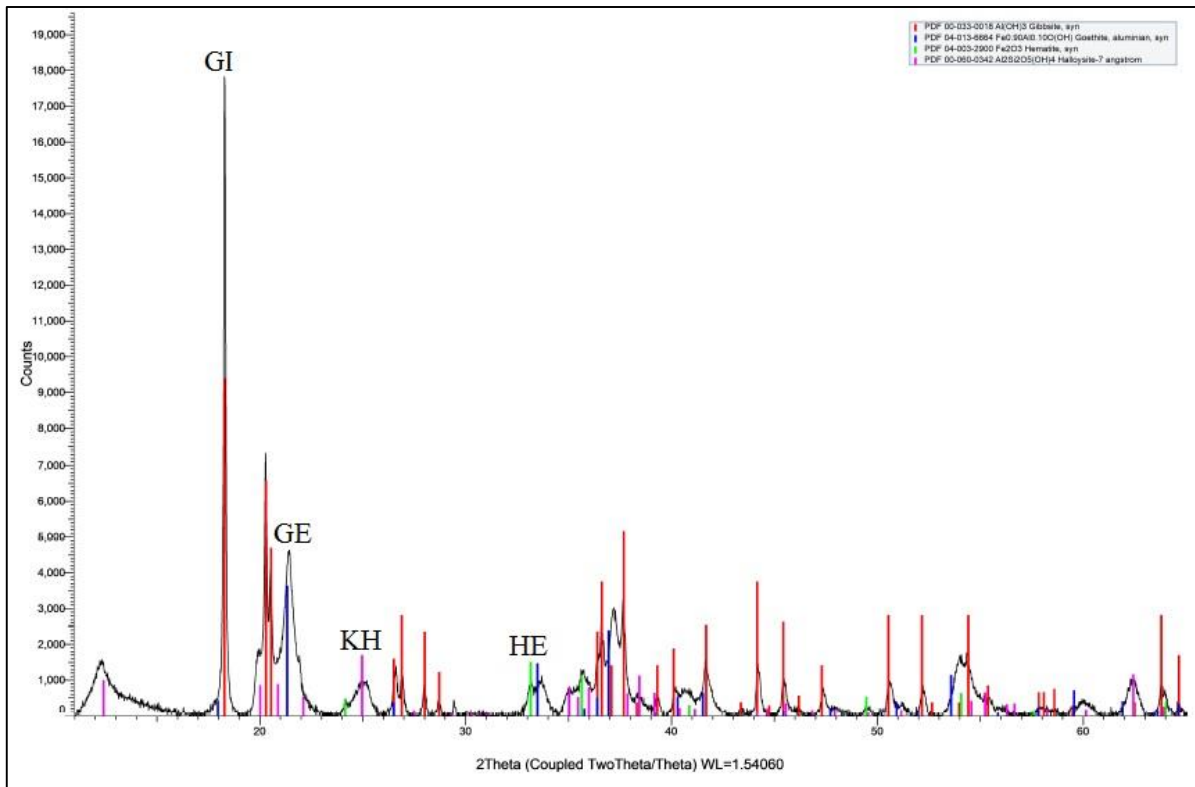


Figura 4.12. Difractograma de arcillas del perfil Convento (P9).

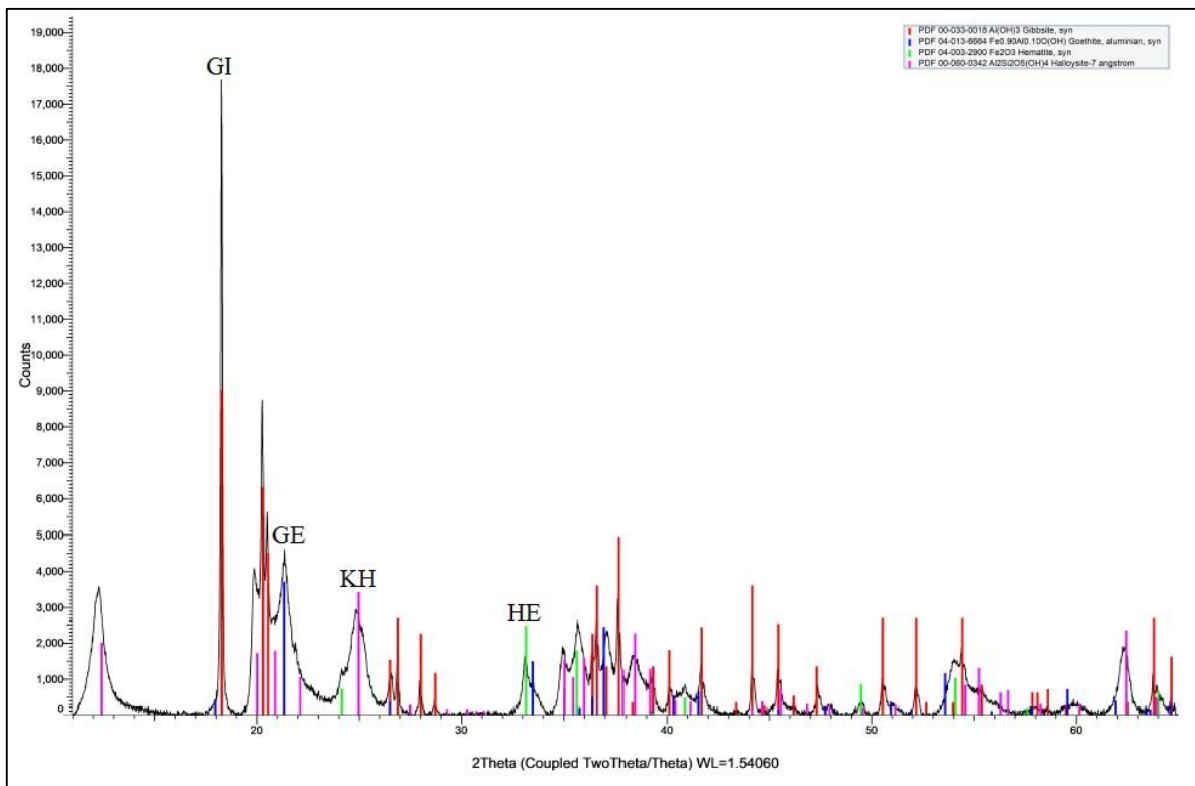


Figura 4.13. Difractograma de arcillas del perfil Buenos Aires (P10).

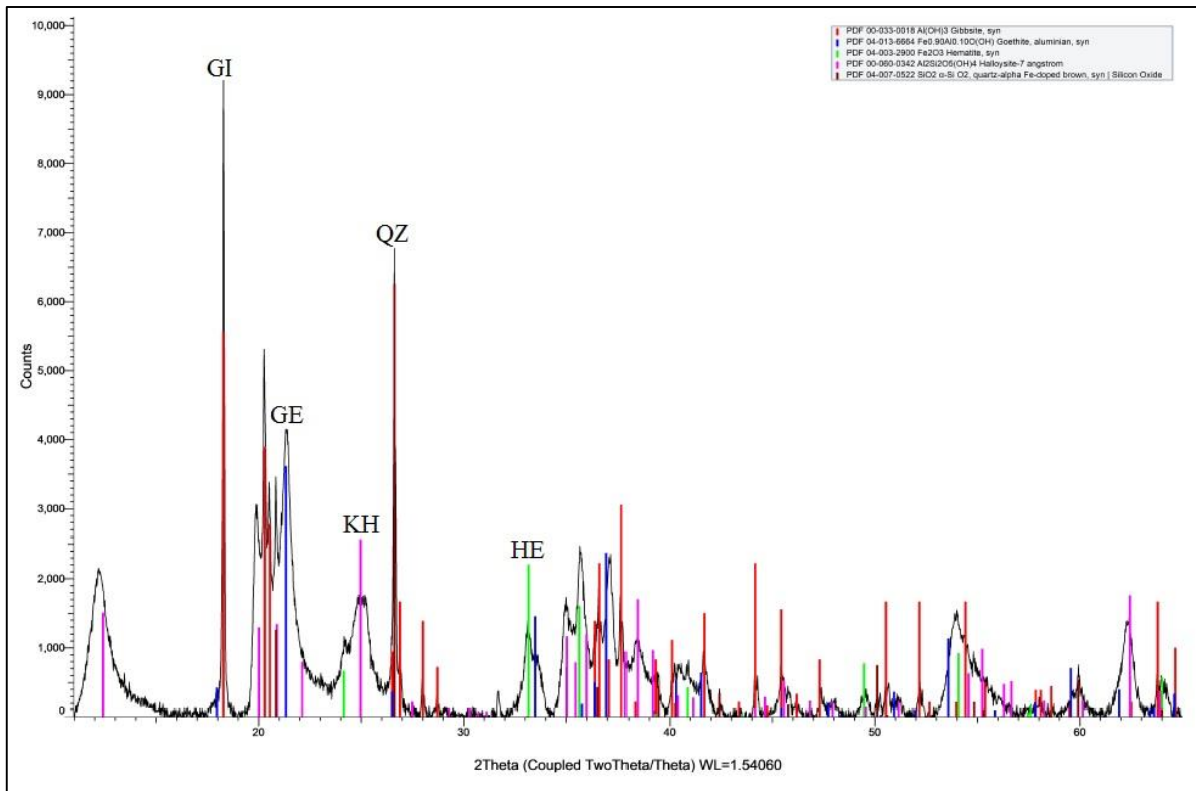


Figura 4.14. Difractograma de arcillas del perfil Cordoncillo (P11).

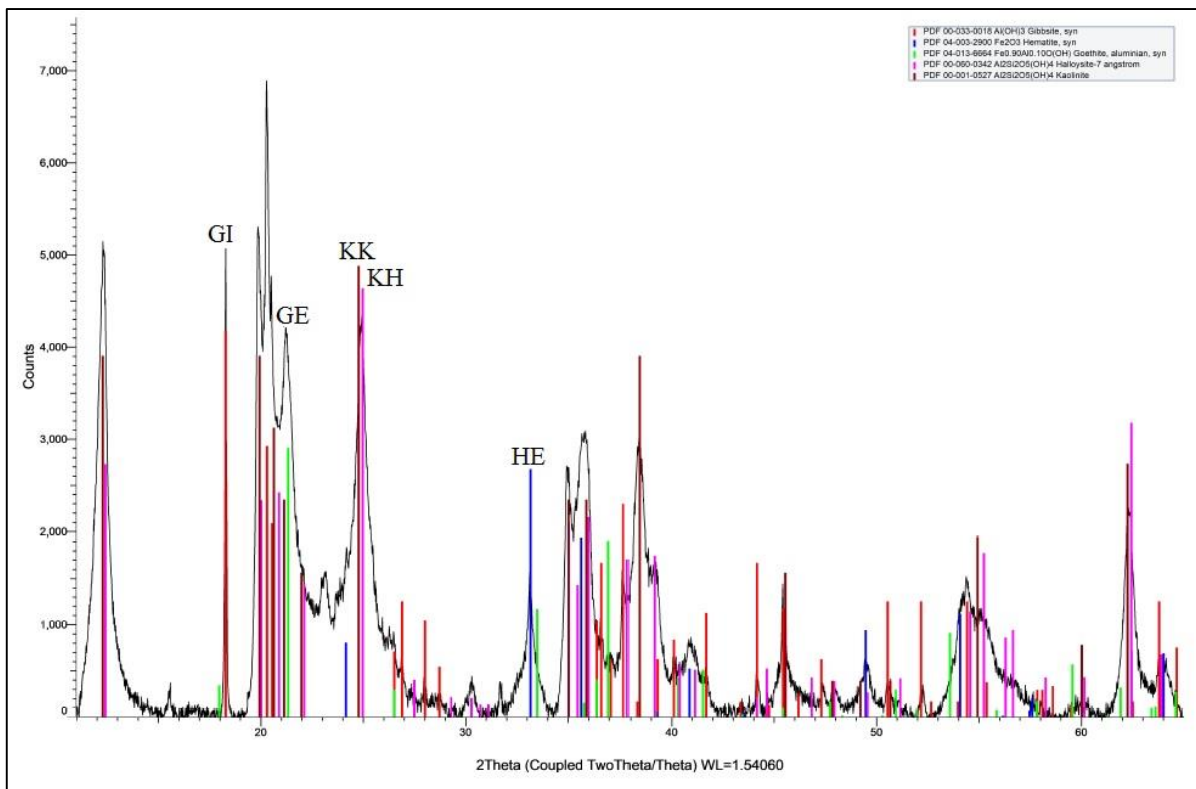


Figura 4.15. Difractograma de arcillas del perfil río Azul (P12).

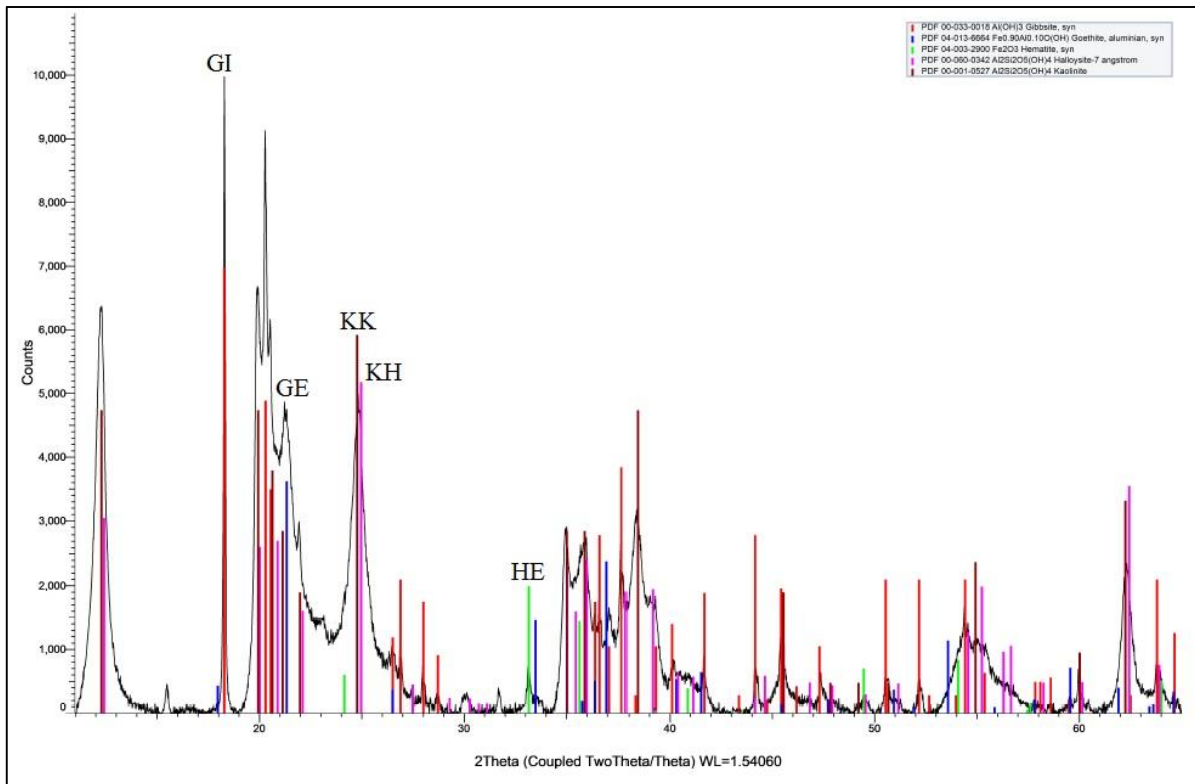


Figura 4.16. Difractograma de arcillas del perfil Puente (P13).

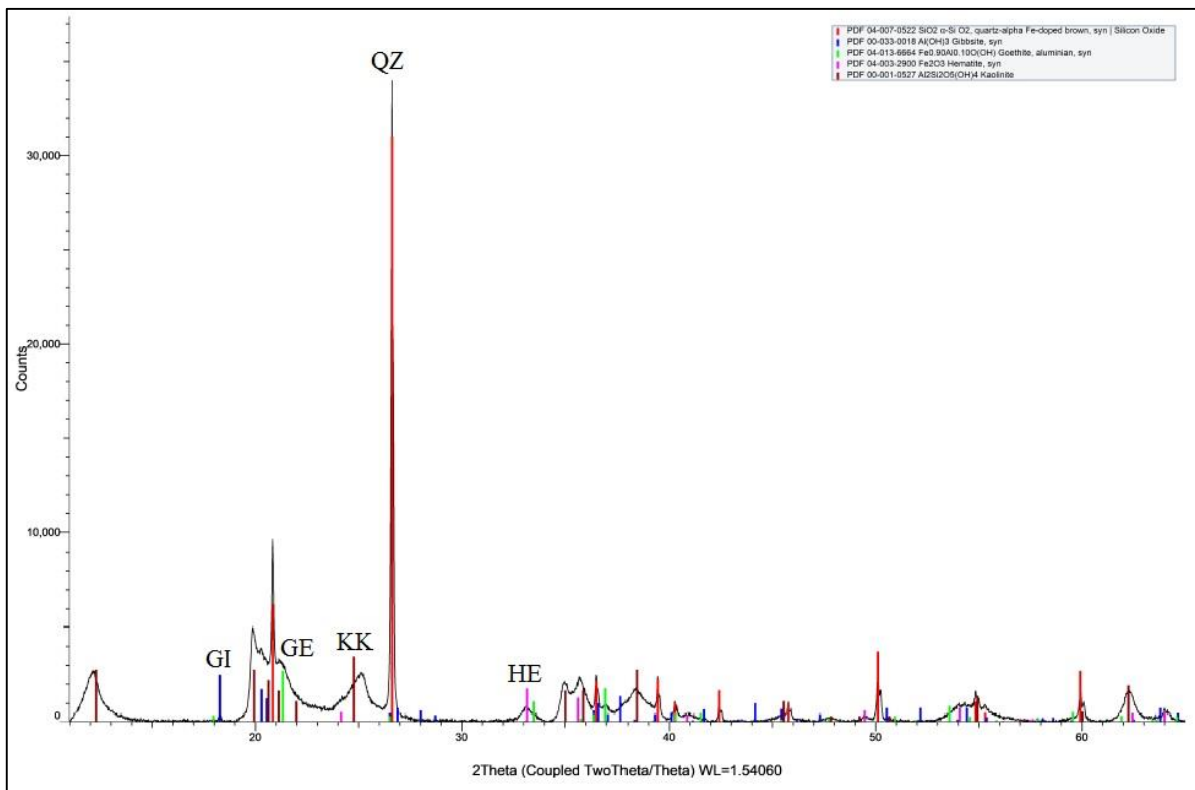


Figura 4.17. Difractograma de arcillas del perfil Sabana La Pelona (P14).

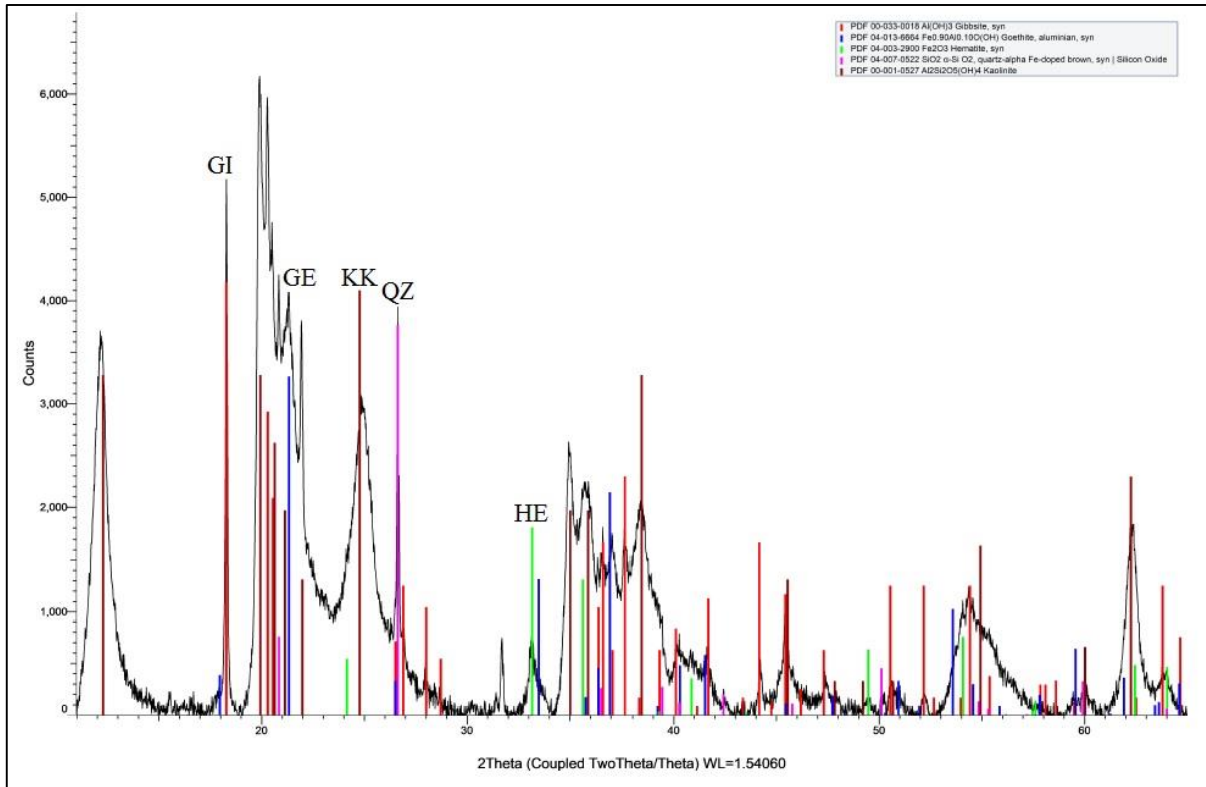


Figura 4.18. Difractograma de arcillas del perfil Dúrika (P15).

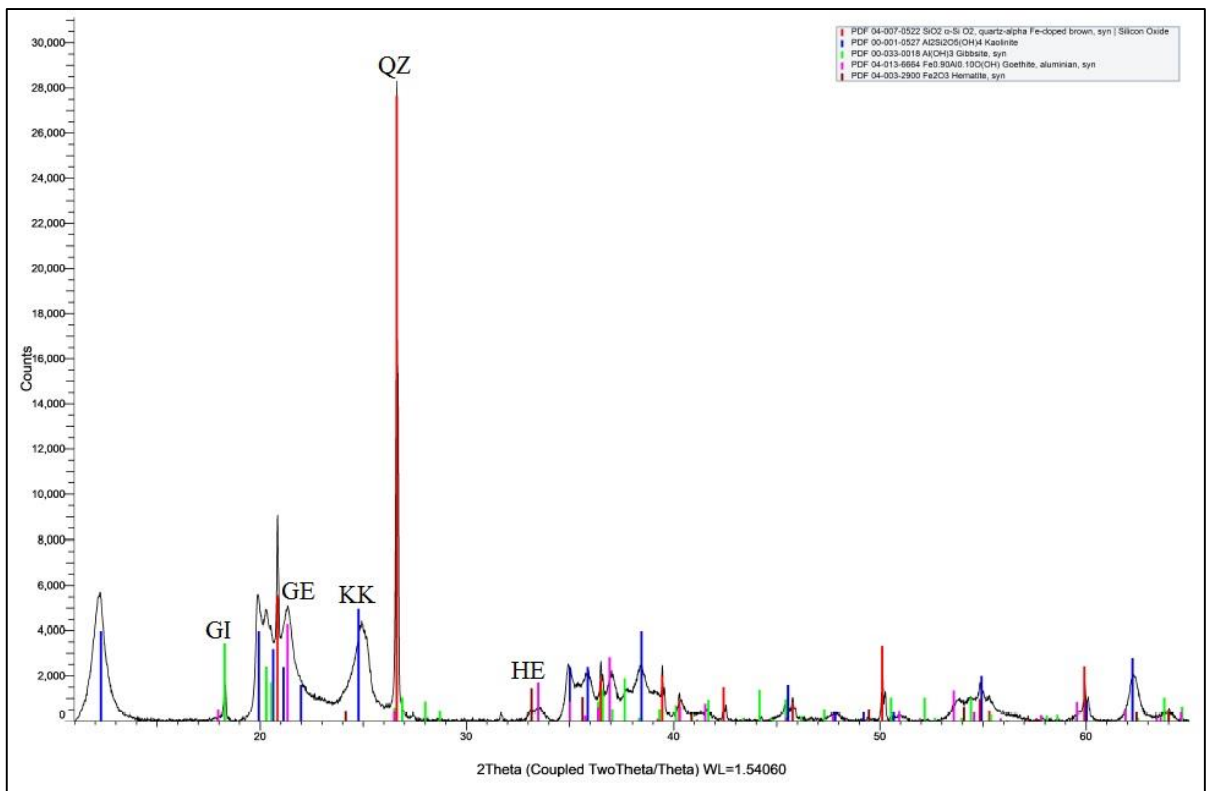


Figura 4.19. Difractograma de arcillas del perfil Alto Guadalajara (P16).

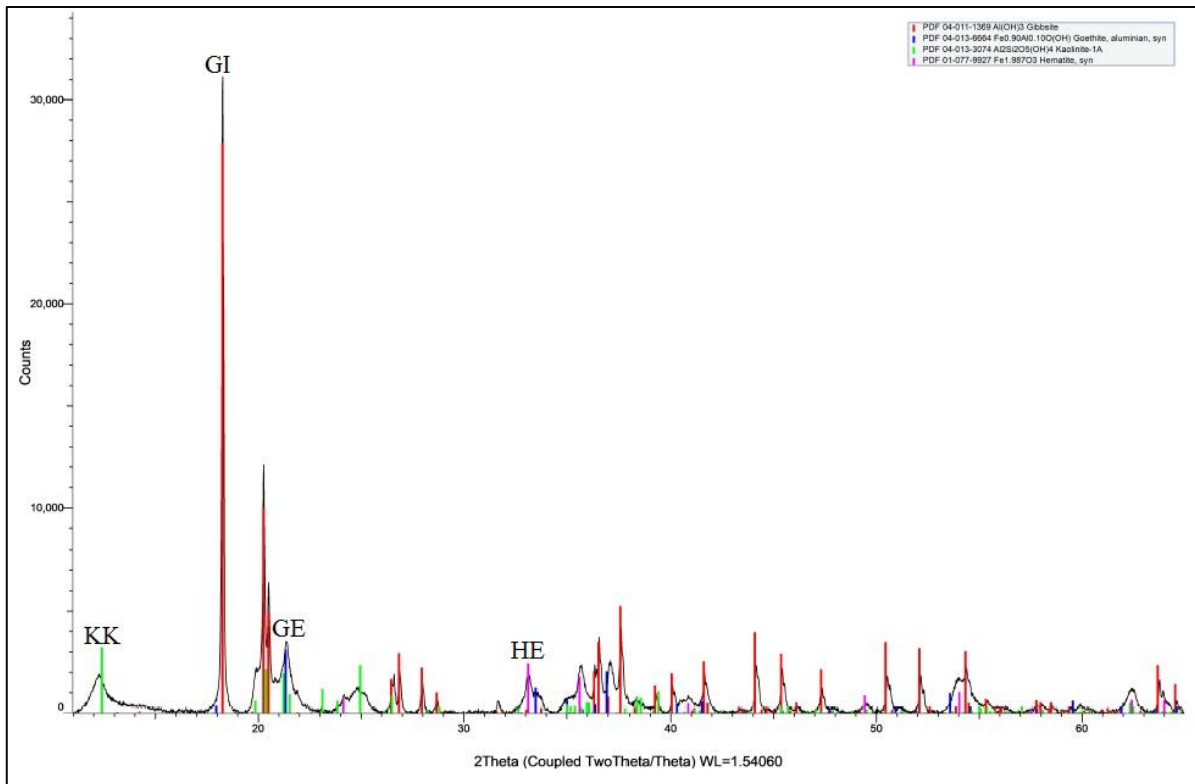


Figura 4.20. Difractograma de arcillas del perfil río Cañas (P17).

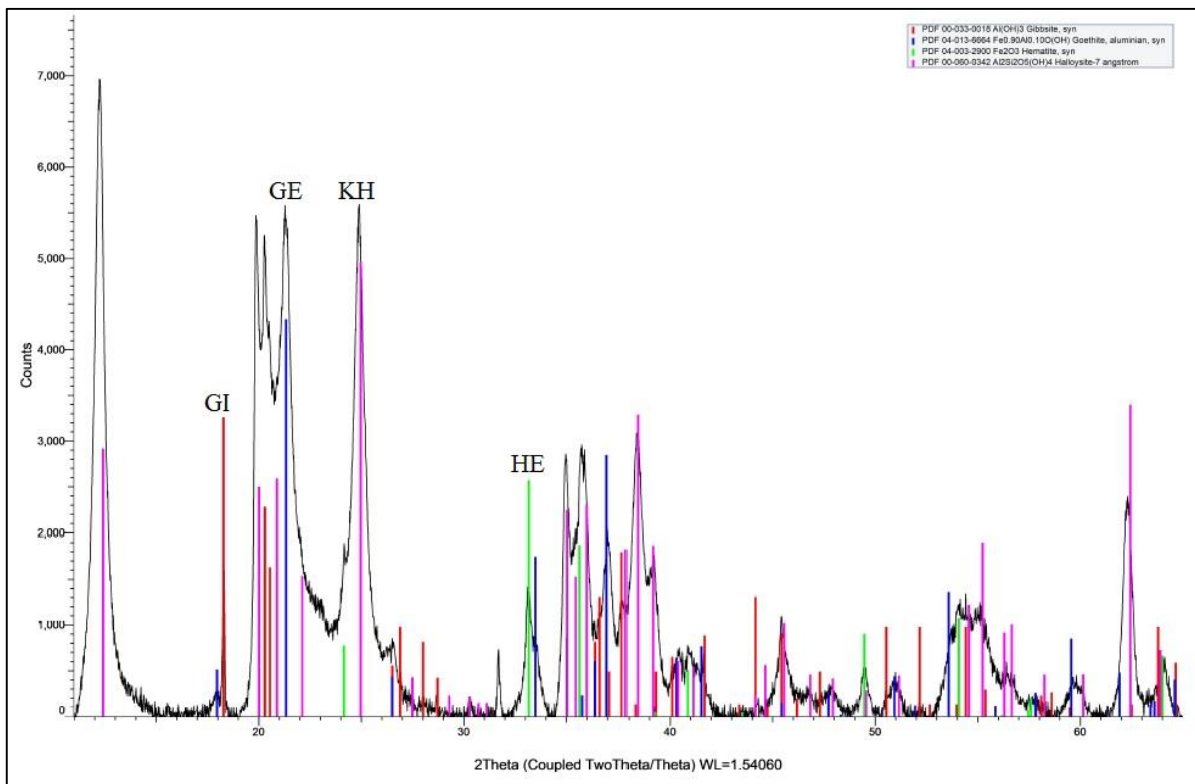


Figura 4.21. Difractograma de arcillas del perfil quebrada Palma (P18).

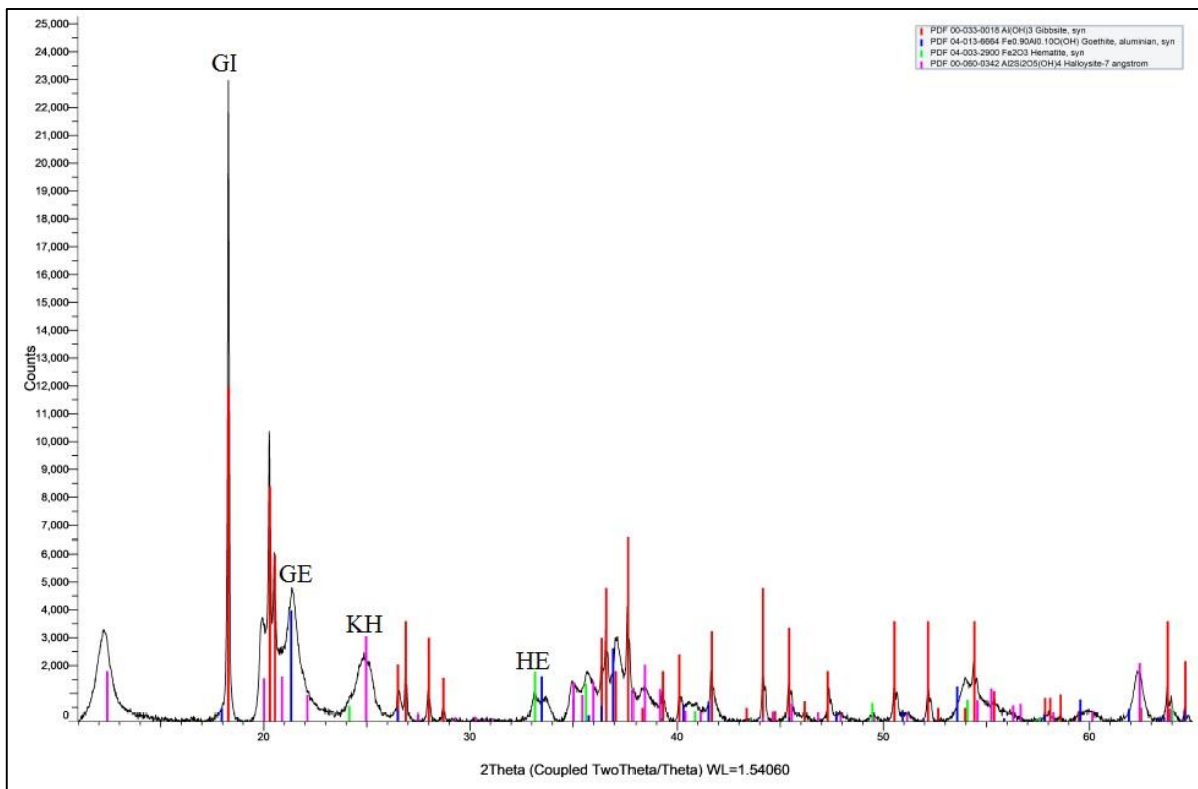


Figura 4.22. Difractograma de arcillas del perfil Cacao (P19).

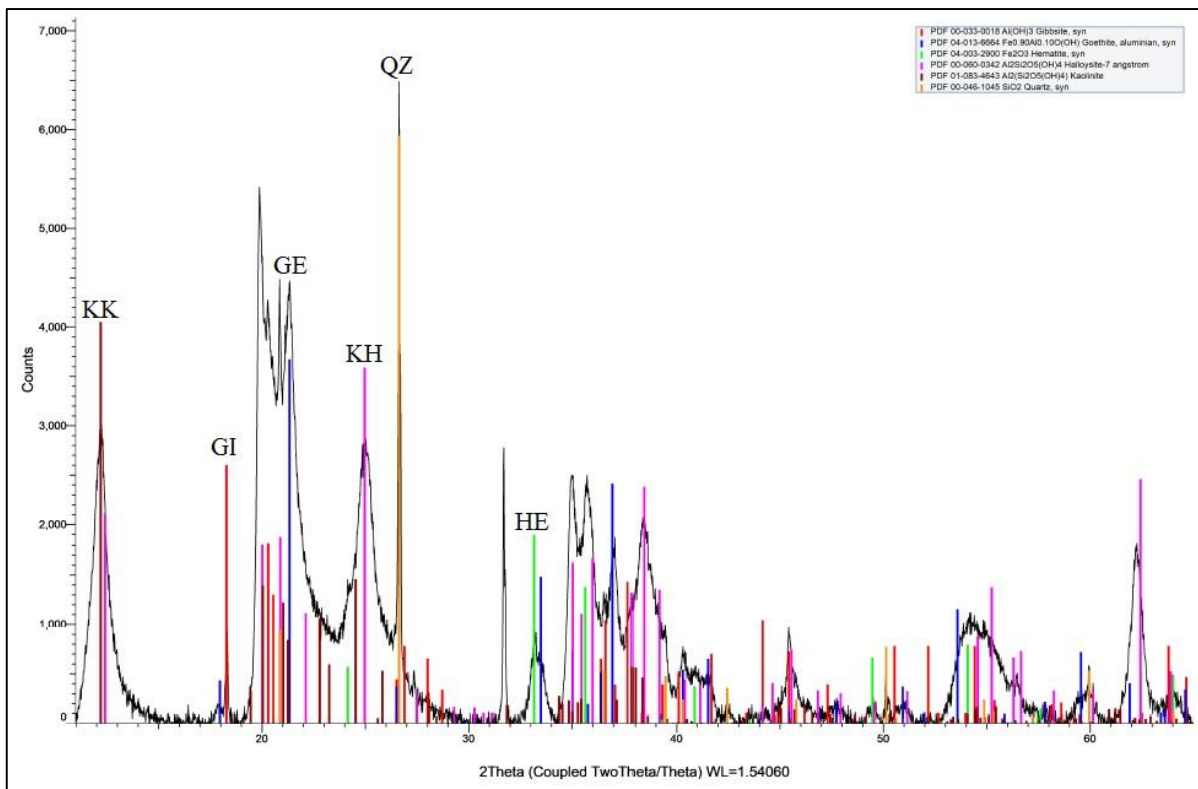


Figura 4.23. Difractograma de arcillas del perfil La Ceiba (P20).

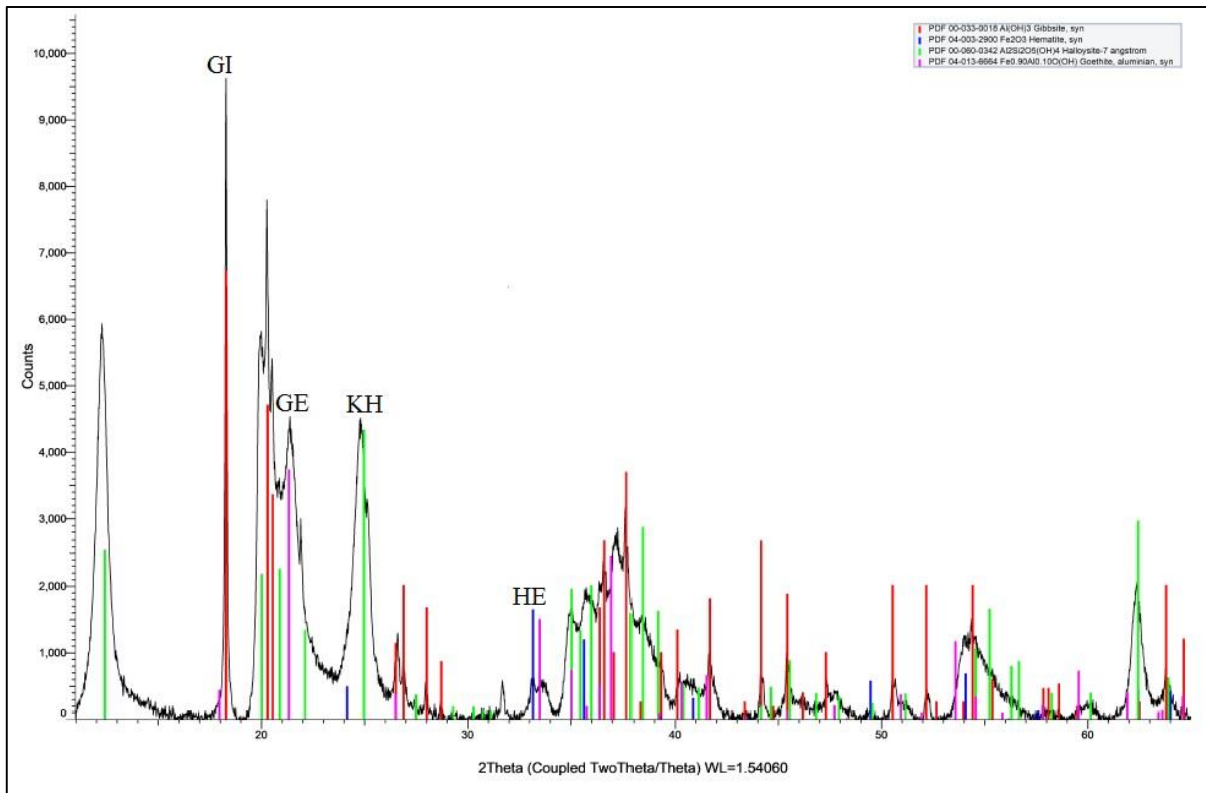


Figura 4.24. Difractograma de arcillas del perfil Las Juntas (P21).

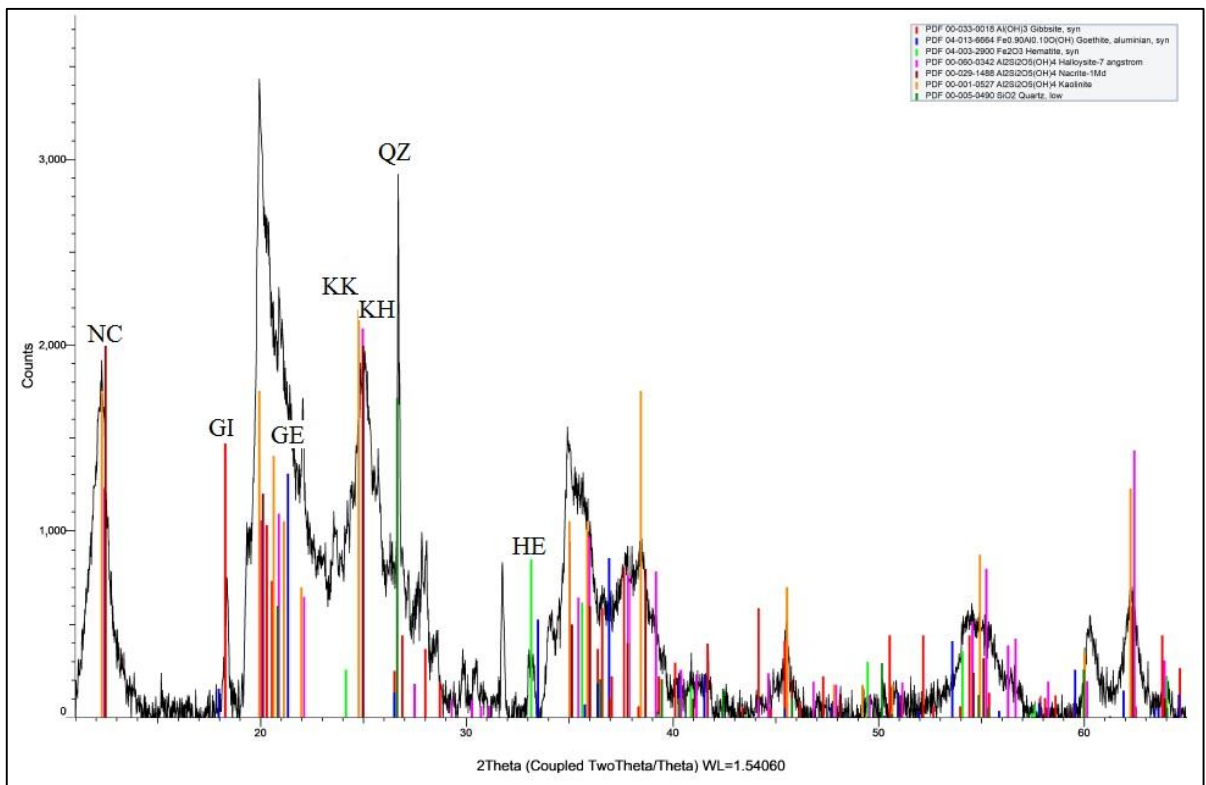


Figura 4.25. Difractograma de arcillas del perfil Ujarrás (P22).

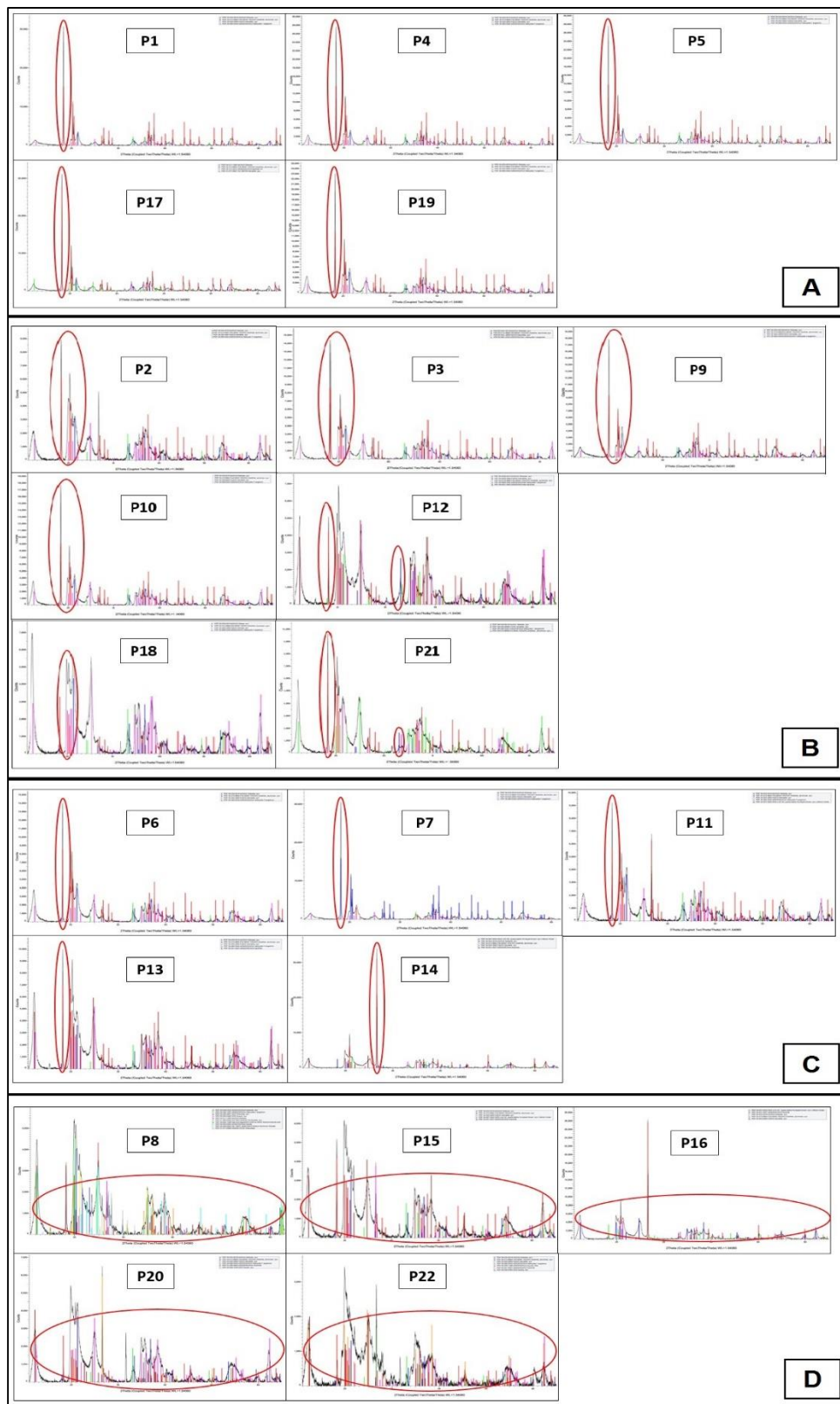


Figura 4.26. Difractogramas agrupados en las 4 clases de mineralogía de arcillas halladas: gibbsítica (A), séssica (B), alítica (C) y mezclada (D).

Cuadro 4.2. Clase de mineralogía de los perfiles descritos, según los criterios de la taxonomía de suelos del USDA.

Perfil	Nombre	Horizonte	Minerales (%)							Clase de mineralogía*
			Gibbsita	Goethita	Hematita	Halloysita	Cuarzo	Caolinita	Otros	
P1	San Juancito	Bt1	50	20	20	10	-	-	-	<i>Gibbsitic</i>
P2	Volcán	Bt2	33	23	22	22	-	-	-	<i>Sesquic</i>
P3	Peje	Bt1	36	27	19	18	-	-	-	<i>Sesquic</i>
P4	Llano Bonito	Bt	45	19	18	18	-	-	-	<i>Gibbsitic</i>
P5	El Ángel Arriba	A2	50	20	20	10	-	-	-	<i>Gibbsitic</i>
P6	El Ángel	Bt2	33	26	16	25	-	-	-	<i>Allitic</i>
P7	Guadalajara	Bt1	38	24	15	23	-	-	-	<i>Allitic</i>
P8	Santa María	A	10			15	12	15	48**	<i>Mixed</i>
P9	Convento	Bt2	36	27	19	18	-	-	-	<i>Sesquic</i>
P10	Buenos Aires	Bt1	33	26	16	25	-	-	-	<i>Sesquic</i>
P11	Cordoncillo	Bt2	29	18	12	18	23	-	-	<i>Allitic</i>
P12	Río Azul	Bt2	36	8	21	7	-	28	-	<i>Sesquic</i>
P13	Puente	Bt2	29	18	12	17	-	24	-	<i>Allitic</i>
P14	Sabana La Pelona	Bt2	19	19	12	-	31	19	-	<i>Allitic</i>
P15	Dúrika	Bt1	23	23	14	-	23	17	-	<i>Mixed</i>
P16	Alto Guadalajara	2Bt1	10	20	10	-	40	20	-	<i>Mixed</i>
P17	Río Cañas	Bt2	42	25	17	-	-	16	-	<i>Gibbsitic</i>
P18	Quebrada Palma	Bt1	31	31	19	19	-	-	-	<i>Sesquic</i>
P19	Cacao	Bt	42	25	16	17	-	-	-	<i>Gibbsitic</i>
P20	La Ceiba	Bt1	12	21	10	18	21	18	-	<i>Mixed</i>
P21	Las Juntas	Bt1	36	28	18	18	-	-	-	<i>Sesquic</i>
P22	Ujarrás	A2	12	16	9	16	16	16	15***	<i>Mixed</i>

* La clase de mineralogía se definió según la Clave para la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 2022).

** Otros en la muestra de Santa María (P8) corresponden a montmorillonita (9 %), tridimita (9 %), aluminosilicato de sodio (9 %), ortoclase (8 %), dicktita (7 %) y ferrihidrita (6 %).

*** Otros en la muestra de Ujarrás (P22) corresponde a nacrita.

Régimen de temperatura del suelo

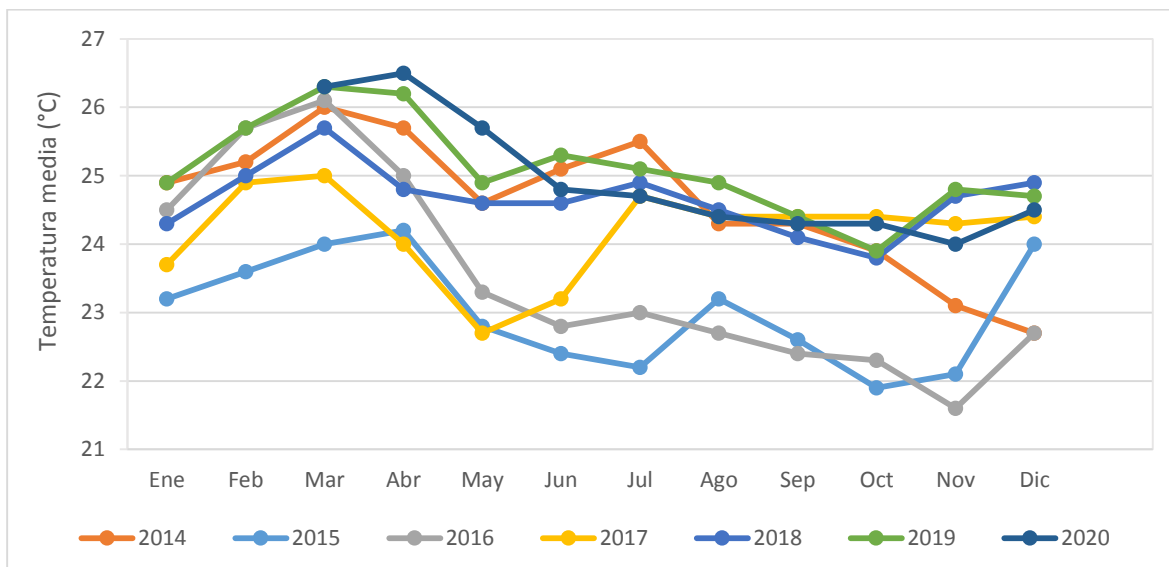


Figura 4.27. Temperaturas promedio (°C) registradas por la estación Planta Volcán, Buenos Aires, entre los años 2014 y 2020 (Fuente: IMN 2022).

Al no disponer de datos de temperatura del suelo, se recurre al registro de temperatura promedio de la estación meteorológica denominada Planta Volcán, ubicada en Buenos Aires de Puntarenas, entre los años 2014 y 2020 (figura 4.27). Con estos datos se obtuvo que la temperatura media de verano es de 24,8 °C, mientras que la temperatura media de invierno es de 23,9 °C; la diferencia entre estos valores es de 0,9 °C, por lo que se infiere que el régimen de temperatura de los suelos en la zona de estudio pertenece al régimen isohipertérmico, ya que las temperaturas son de 22 °C o más altas y no hay diferencia mayor a 6 °C entre la temperatura media de verano y la temperatura media de invierno.

Definidas la clase de tamaño de partícula, la clase de mineralogía y el régimen de temperatura del suelo, se estableció la clasificación taxonómica a nivel de familia mineralógica. Para esto se nombran las clases mencionadas anteriormente en idioma inglés, en ese mismo orden, separando las clases por una coma (,) y adicionando al final la clasificación taxonómica a nivel de subgrupo (obtenida en el capítulo 3), pero en esta ocasión eliminando la letra “s” del final, ya que ahora se hace referencia a un individuo suelo (USDA-SCS 1999). La clasificación taxonómica a nivel de familia mineralógica de los 22 perfiles se puede ver continuación en el cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Clasificación taxonómica a nivel de familia mineralógica de los perfiles descritos según los criterios de la taxonomía de suelos del USDA.

Perfil	Nombre	Clasificación a nivel de familia mineralógica*
P1	San Juancito	Very-fine, gibbsitic, isohyperthermic Humic Rhodic Kandiustox
P2	Volcán	Very-fine, sequic, isohyperthermic Lithic Kandiustox
P3	Peje	Very-fine, sequic, isohyperthermic Typic Kandiustox
P4	Llano Bonito	Very-fine, gibbsitic, isohyperthermic Lithic Kandiustox
P5	El Ángel Arriba	Coarse-loamy, gibbsitic, isohyperthermic Vitrandic Ustorthent
P6	El Ángel	Very-fine, allitic, isohyperthermic Humic Kandiustox
P7	Guadalajara	Fine, allitic, isohyperthermic Humic Acrustox
P8	Santa María	Loamy-skeletal, mixed, isohyperthermic Typic Ustorthent
P9	Convento	Very-fine, sequic, isohyperthermic Humic Rhodic Acrustox
P10	Buenos Aires	Very-fine, sequic, isohyperthermic Rhodic Kandiustox
P11	Cordoncillo	Very-fine, allitic, isohyperthermic Humic Rhodic Kandiustox
P12	Río Azul	Very-fine, sequic, isohyperthermic Typic Kandiustox
P13	Puente	Very-fine, allitic, isohyperthermic Typic Kandiustox
P14	Sabana La Pelona	Very-fine, allitic, isohyperthermic Rhodic Kandiustox
P15	Dúrika	Very-fine, mixed, isohyperthermic Typic Palehumult
P16	Alto Guadalajara	Very-fine, mixed, isohyperthermic Typic Kandiustox
P17	Río Cañas	Fine, gibbsitic, isohyperthermic Rhodic Acrustox
P18	Quebrada Palma	Very-fine, sequic, isohyperthermic Typic Kandiustox
P19	Cacao	Very-fine, gibbsitic, isohyperthermic Rhodic Kandiustox
P20	La Ceiba	Fine, mixed, isohyperthermic Ustic Palehumult
P21	Las Juntas	Very-fine, sequic, isohyperthermic Ustic Palehumult
P22	Ujarrás	Fine-loamy, mixed, isohyperthermic Typic Ustorthent

* Clasificación según la Clave para la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 2022).

Discusión

Tamaño de partícula

El concepto de tamaño de partícula del suelo, es distinto al concepto de textura; el tamaño de partícula se utiliza para determinar las proporciones en peso de los minerales inorgánicos de la fracción arcilla y es fundamental para comprender la química del suelo, su funcionamiento físico y para la clasificación del suelo dentro de cualquier sistema taxonómico actual (Leño 2016). En suelos altamente meteorizados como Oxisoles y Ultisoles, los tamaños partícula suelen ser muy fino y fino, ya que como explican Muggler *et al.* (1997), en estos suelos la fracción arcillosa tiende a aumentar debido a los procesos de meteorización, lo que resulta en la disminución y hasta la desaparición de las fracciones de limo y arena, que pueden ser los efectos que están sufriendo los Oxisoles y Ultisoles de Buenos Aires de Puntarenas. Esto provoca la acumulación de materiales más finos, lo que conduce a una reducción significativa del volumen de macroporos y aumento del volumen de microporos, lo que limita la permeabilidad al agua y al aire de estos suelos (da Silva *et al.* 2020); de manera que la influencia del clima, la vegetación y el material parental, influyen en la transformación de los minerales arcillosos (Ndzana *et al.* 2019).

Por el contrario, en suelos menos meteorizados los tamaños de partícula más gruesos, como los Entisoles descritos por Martín-García *et al.* (2015), cuyos tamaños de partículas fueron franco-fino, franco-grueso, como los perfiles El Ángel Arriba (P5) y Ujarrás (P22); incluso más gruesos como franco-arenoso y arenoso, y con sustitutos de clase tamaños de partícula, cuando se presenten fragmentos de roca de 2 mm de diámetro o más grandes, en un 35 % o más del volumen total del del suelo (Lund *et al.* 1974; Shabbir y Samira 2022), como el perfil Santa María (P8).

Clase de mineralogía

Las técnicas de difracción de rayos X en polvo se encuentran entre las herramientas más importantes para la identificación y caracterización de materiales; gran parte de la información del patrón de un polvo, que se deriva directamente de la disposición atómica de las fases presentes, así como de la identificación de las fases cristalinas, como ocurre en el caso de las arcillas (Williams *et al.* 1982).

Según Alvarado *et al.* (2014), el estudio de la mineralogía de arcillas en suelos de Costa Rica inicia con Anderson y Byers en 1931, y continúa en el presente con herramientas especializadas; también mencionan que mediante esta metodología se lograron identificar Oxisoles a partir de muestras tomadas en el Valle del río General y los datos obtenidos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-SCS 2012) permitieron determinar que dominaban halloysita y gibbsita, corroborando lo registrado por Kesel y Spicer (1985) con muestras de la misma región encontraron Oxisoles formados sobre los depósitos más antiguos en donde dominan gibbsita y caolinita.

Gómez y Chinchilla (2005) en su estudio taxonómico y mineralógico de los suelos del río Térraba, caracterizaron Entisoles y Ultisoles y la mineralogía de estos suelos, mostró importantes contenidos de gibbsita, hematita, caolinita y cuarzo como minerales dominantes, y son considerados como minerales resistentes (Soil Survey Staff 2004). Lo que concuerda con la mineralogía de los suelos altamente meteorizados de Buenos Aires de Puntarenas, parece indicar estos que provienen de materiales previamente alterados, y son los que formaron los suelos, con escasa fertilidad que vemos en la actualidad (Ker *et al.* 2015). En las figuras de la 4.28 a la 4.31 se muestran fotografías de arcillas con diferentes clases de mineralogía encontradas, que fueron tomadas mediante microscopio electrónico de barrido en el CIEMIC (Centro de Investigaciones en Estructuras Microscópicas) de la UCR.

En los resultados de los análisis de difracción de rayos X de los suelos estudiados en esta investigación muestran que los perfiles clasificados como Oxisoles San Juancito (P1), Llano Bonito (P4), río Cañas (P17), Cacao (P19), e incluso el perfil El Ángel Arriba (P5) que se clasificó como Entisol, tienen dominancia de la gibbsita en su fracción mineral. La gibbsita es un óxido de aluminio, mineral muy común y abundante en suelos formados en regiones tropicales (Fontes y Weed 1991; Ker 1997); se puede encontrar grandes cantidades en regiones subtropicales, en horizontes de suelo expuestos a altas tasas de lixiviación (Macías-Vázquez 1981; Caner *et al.* 2014). Es uno de los principales constituyentes de los depósitos de bauxita, principal fuente natural de aluminio, y es un producto de la meteorización extremadamente avanzada de los aluminosilicatos de los suelos (Rosenqvist 2002).

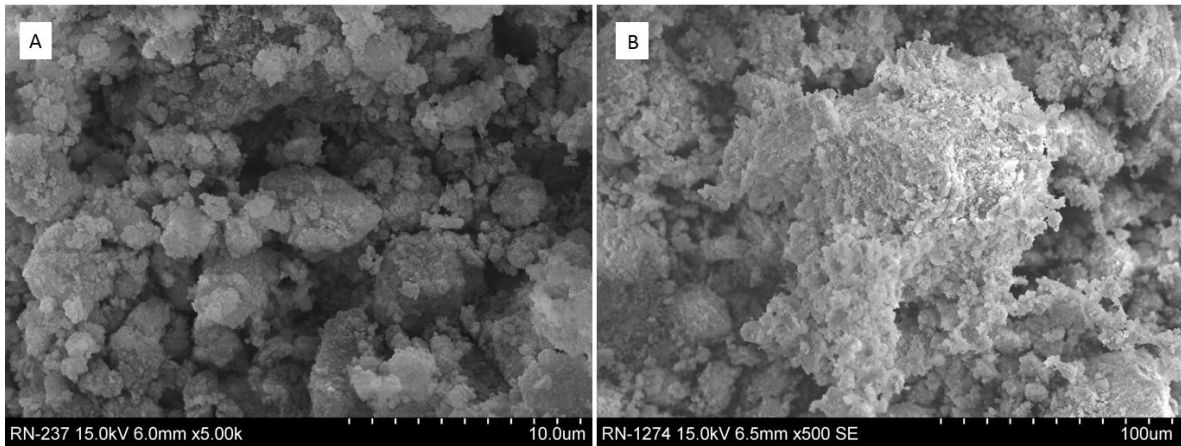


Figura 4.28. Fotografías tomadas mediante microscopio electrónico de barrido de minerales de arcilla de los perfiles A. Llano Bonito (P4) y B. Río Cañas (P17) correspondientes a una clase mineralógica gibbsítica.

Los perfiles Volcán (P2), Peje (P3), Convento (P9), Buenos Aires (P10), río Azul (P12), quebrada Palma (P18) y Las Juntas (P21) tienen una mineralogía sésquica; eso quiere decir que no hay dominancia de la gibbsita en la fracción mineral, si no que también hay presencia de óxidos de hierro como goethita y la hematita (Soil Survey Staff 2004), que en conjunto se les conoce como sesquióxidos; se encuentran en los suelos como compuestos inorgánicos amorfos y cristalinos (Maniyunda *et al.* 2015). Los sesquióxidos de hierro y aluminio influyen en el comportamiento de los suelos al recubrir los constituyentes arcillosos y unirlos en agregados más gruesos (Townsend *et al.* 1971), generalmente Oxisoles y Ultisoles como los reportados por Bigham *et al.* (1978) y por Macedo *et al.* (1987).

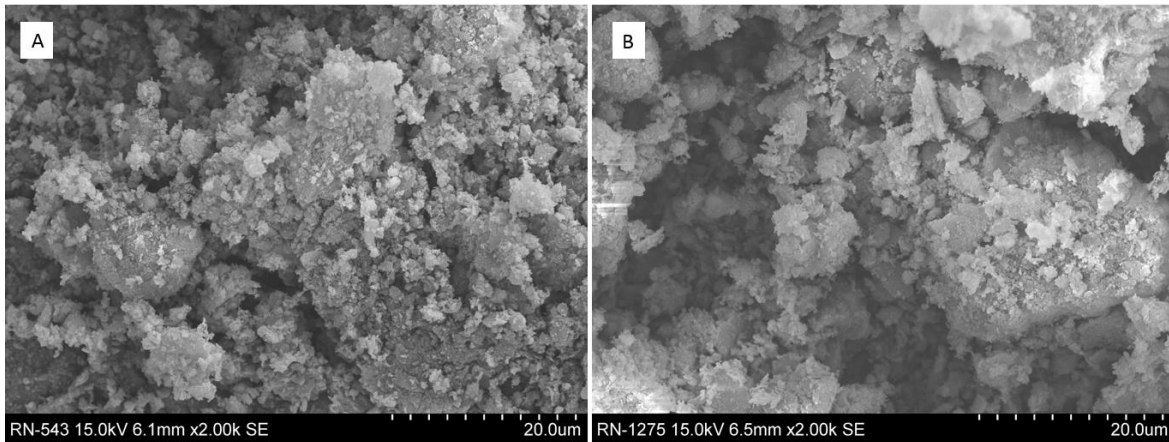


Figura 4.29. Fotografías tomadas mediante microscopio electrónico de barrido de minerales de arcilla de los perfiles A. Buenos Aires (P10) y B. Quebrada Palma (P18) correspondientes a una clase mineralógica sésquica.

Los perfiles El Ángel Arriba (P6), Guadalajara (P7), Cordoncillo (P11), Puente (P13) y Sabana La Pelona (P14) presentaron una mineralogía Alítica. Como mencionan Soca y Daza-Torres (2016), los suelos alíticos suelen presentar un perfil tipo ABC. Se caracterizan por una meteorización casi completa de los minerales primarios, son suelos típicos del trópico húmedo ricos en aluminio, pero en menor medida que los suelos gibbsíticos, algunos pueden ser ricos en halloysita, como ocurre con los perfiles estudiados; en la taxonomía de suelos, corresponden principalmente a Oxisoles (Latham 1982).

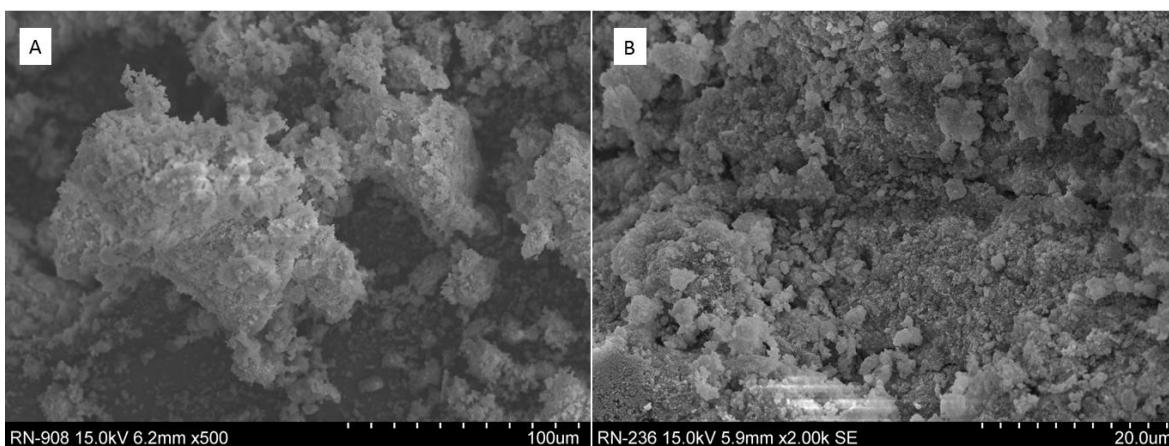


Figura 4.30. Fotografías tomadas mediante microscopio electrónico de barrido de minerales de arcilla de los perfiles A. El Ángel (P5) y B. Guadalajara (P7) correspondientes a una clase mineralógica alítica.

Y los perfiles clasificados como Entisoles, Santa María (P8) y Ujarrás (P22), los perfiles Dúrika (P15) y La Ceiba clasificados como Ultisoles, y el perfil Alto Guadalajara (P16) clasificado como Oxisol, tienen una mineralogía Mezclada. Este tipo de mineralogía se designa cuando la fracción arcillosa tiene más de más 40 % de cualquier mineral que no sea cuarzo o feldespatos (Sultan 2006). Por lo general este tipo de mineralogía se asocia a suelos jóvenes, ligeramente erosionados, con arcillas 2:1, suelos moderadamente meteorizados con mezcla de arcillas 2:1 y 1:1, pero también puede presentarse en suelos tropicales altamente erosionados dominados por óxidos de hierro y aluminio y minerales arcillosos 1:1 (Denef *et al.* 2002). Esta mineralogía ha sido reportada Sufardi *et al.* (2021) en Entisoles, Inceptisoles y Oxisoles, que contiene minerales como feldespatos, cuarzo, ortoclasa, halloysita, montmorillonita, considerados minerales meteorizables (Soil Survey Staff 2004), entre otros; y también en Ultisoles por Nurcholis (2010) al encontrar caolinita y esmectitas en la fracción arcillosa de suelos clasificados como Paleudults.

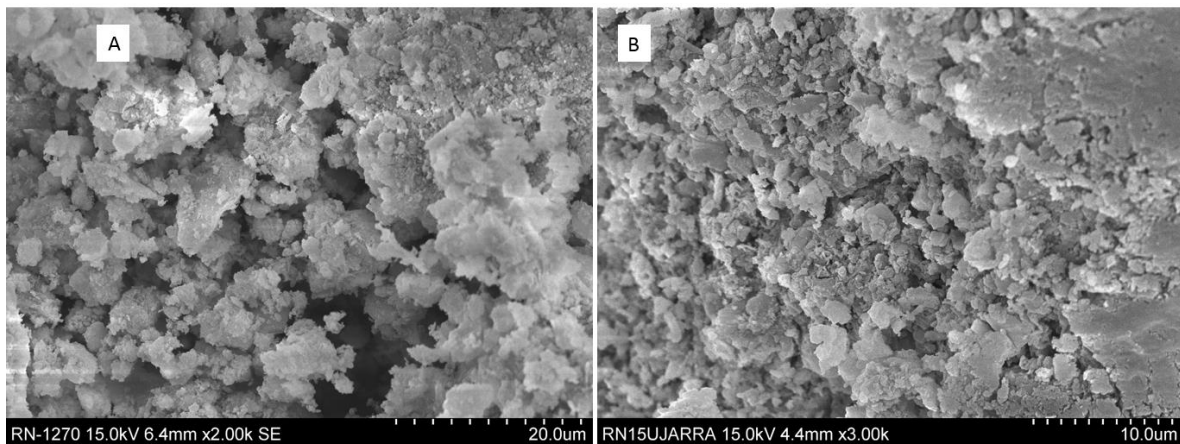


Figura 4.31. Fotografías tomadas mediante microscopio electrónico de barrido de minerales de arcilla de los perfiles A. Alto Guadalajara (P16) y B. Ujarrás (P22) correspondientes a una clase mineralógica mezclada.

Régimen de temperatura del suelo

Como se mostró en la figura 4.25, las temperaturas registradas por la estación Planta Volcán, en Buenos Aires de Puntarenas, entre 2014 y 2020 las temperaturas permanecen por encima de los 22 °C, y debido a que la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano y la media en invierno no es mayor a 6 °C, el régimen de temperatura del suelo es

isohipertérmico. Este régimen de temperatura ha sido reportado por Alvarado *et al.* (1982) en su estudio de suelos San Ignacio de Acosta; Lansu (1988), en su estudio de suelos en la zona Atlántica del país; en el estudio de perfiles de suelos de Liberia, Turrialba, río Colorado, Guápiles, Guácimo, Limón y Montelimar del CATIE-ISRIC (1994); en Turrialba por Forsythe (2002); en la Península de Santa Elena por Alexander (2018); y más recientemente, en el estudio de Camacho *et al.* (2021) sobre la morfología y características de ocho Oxisoles en paisajes contrastantes de Costa Rica.

Mineralogía de los suelos altamente meteorizados de Buenos Aires de Puntarenas

La mayor parte de los suelos de Buenos Aires de Puntarenas son lateríticos, término que se utiliza para describir aquellos suelos residuales rojos que se encuentran abundantemente en regiones tropicales y subtropicales del mundo; geomorfológicamente, la laterización implica la lixiviación o eliminación de sílice, álcali y alcalinotérreos y la concentración de óxidos de hierro y aluminio (sesquióxidos) (Townsend *et al.* 1971). Son suelos profundos y muy meteorizados, dominados por minerales de baja actividad 1:1 y oxihidróxidos de hierro y aluminio, en proporciones variables según el material original y la intensidad de la meteorización; su mineralogía es típica: gibbsita, hematita, goethita, caolinita o halloysita, por lo que son suelos de baja fertilidad (Schaefer *et al.* 2008).

La presencia de gibbsita, hematita, goethita y caolinita, con pequeñas cantidades de halloysita, en estudios de mineralogía de arcilla de los suelos de la zona sur del país (USDA-SCS 1999; Alvarado-Hernández 2022); además, Kesel y Spicer (1985), en los depósitos aluviales más antiguos del Valle del General, reportan la dominancia de gibbsita, lo que es reforzado por Pacheco (1990), que encontró en suelos de Buenos Aires de Puntarenas, gibbsita, acompañada de hematita, goethita y caolinita.

La presencia de gibbsita en estos suelos influye en gran medida en sus características físicas y químicas, ya que la gibbsita está relacionada con varias características de interés económico y ambiental, como la mayor estabilidad de los agregados, la floculación de las partículas del suelo y disolución del pH (Gasparini *et al.* 2022), y la adsorción casi irreversible de fósforo, cuando se asocia con goethita y hematita (Schaefer *et al.* 2008). La gibbsita también se puede

encontrar en suelos jóvenes, lo que explica la mineralogía del perfil El Ángel Arriba (P5), y la presencia de este mineral en los perfiles Santa María y Ujarrás (P22), y que generalmente es atribuida a la rápida desilicación que ocurre en materiales muy permeables bajo altas precipitaciones y al paleoclima (Watanabe *et al.* 2010).

La meteorización geoquímica, es decir reacciones de hidrólisis, provocan la concentración de óxidos libres, que cuando se trata de óxidos de hierro y óxidos de aluminio en forma proporcionada, originan los suelos sésquicos (Duchaufour 1982). De manera que la naturaleza, contenido y distribución de los sesquióxidos influye en los procesos pedogenéticos y propiedades fisicoquímicas de los suelos (Jelic *et al.* 2011). Esta mineralogía también se asocia a la retención de fósforo, fenómenos de carga superficial, formación y estabilización de los agregados del suelo (Maniyunda *et al.* 2015). La naturaleza y contenido de los sesquióxidos en estos suelos se han utilizado para hacer predicciones con respecto al tipo, dirección, grado y etapa de pedogénesis (Osodeke *et al.* 2005). Los suelos alíticos se caracterizan por una meteorización casi completa de los minerales primarios a excepción del cuarzo, otros minerales como moscovita, y la síntesis de sesquióxidos de hierro y aluminio, y de caolinita o halloysita, por lo que algunos suelos ferralíticos son ricos en halloysita (Latham 1982). Alvarado-Hernández (2022) menciona que la presencia de halloysita ha sido reportada en suelos donde se presentan periodos secos sin déficit de humedad. La mineralogía mezclada, resultado de la presencia de arcillas 2:1, arcilla de capas mixtas, y otros minerales, contribuyen a mejorar significativamente a la CIC de los suelos (Sultan 2006).

Conclusiones

- Las arcillas son minerales secundarios que se generan por procesos de erosión, diagénesis y meteorización, y son el componente principal de los suelos alrededor del mundo.
- Factores ambientales como el agua, la temperatura, la condición de reducción/oxidación, las actividades biológicas y el tiempo afectan el comportamiento de los minerales secundarios en el suelo.
- Los suelos altamente meteorizados de Buenos Aires de Puntarenas presentan en su mayoría, tamaños de partícula muy fina y fina, característicos de suelos viejos y meteorizados.
- Los registros de temperatura permiten determinar que la zona de estudio presenta un régimen de temperatura del suelo isohipertérmico.
- La gibbsita es el principal mineral presente en los suelos altamente meteorizados de Buenos Aires de Puntarenas, seguido por goethita, hematita y halloysita, los cuales son considerados como minerales no meteorizables o resistentes.
- Los minerales encontrados en la fracción arcilla les confiere a estos suelos una baja capacidad de intercambio catiónico, lo que se manifiesta en su escasa fertilidad.

Literatura citada

Al-Ani, T; Sarapää, O. 2008. Clay and clay mineralogy. Physical-Chemical properties and industrial uses. Geological Survey of Finland. 96 p.

Alexander, EB. 2018. Serpentine Landscapes of Costa Rica the Santa Elena Peninsula. Soils and Geoecology. 36 p

Alvarado, A; Glover, N; Obando, O. 1982. Reconocimiento de los suelos de Puriscal, Salitrales y Tabarcia - San Ignacio de Acosta, Costa Rica, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Alvarado-Hernández, A. 2022. Suelos de Centroamérica. 1 Ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. Editorial Universidad Nacional. Editorial Universidad Estatal a Distancia. Editorial Técnica Nacional. Cartago, Costa Rica. 362 p.

Alvarado, A; Mata, R; Chinchilla, M. 2014. Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931-2014: I. Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía Costarricense* 38 (1): 75-106.

Anderson, MS; Byers, HG. 1931. Character of the colloidal materials in the profiles of major soil groups of the United States. U.S. Dept. Agr. Tech. Bull. 228 p.

Aukland, 1959. Clay mineralogy techniques. A review. Department of Natural Resources. Ohio, USA. 36 p.

Áviles, MA; Erbez, JA; Sánchez, PJ; Pérez, JL. 1993. Aplicación de las vermiculitas de Andalucía a la síntesis de cerámicas avanzadas. *Boletín Sociedad Española de Ceramistas*. Vol. 32. 2. 101-112 p.

Bergaya, F; Lagaly, G. 2006. General introduction: clays, clay minerals, and clay science. *Developments in clay science*. Vol 1. 1-18 p.

Besoain, E. 1985. *Mineralogía de arcillas de suelos*. San José, CR, IICA. 1216 p.

Bigham, JM; Golden, DC; Bowen, LH; Buol, SW; Weed, SB. 1978. Iron Oxide Mineralogy of Well-drained Ultisols and Oxisols: I. Characterization of Iron Oxides in Soil Clays by Mössbauer Spectroscopy, X-ray Diffractometry, and Selected Chemical Techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 816-825 p.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200050033x>

Birkeland, PW. 1974. *Pedology, weathering and geomorphological research*. Oxford University Press. London. New York. 1974.

Blanco, I. 2010. Estudio de la dispersión y exfoliación de nanopartículas inorgánicas y modificación de polietileno con ácido itacónico aplicando ultrasonido durante la extrusión reactiva. Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Tecnología de Polímeros. Saltillo, Coahuila. Mexico. 105 p.

Bowen, NL. 1928. *The Evolution of the Igneous Rocks*: Princeton, New Jersey, Princeton University Press. 332 p.

Buol, SW; Couto, W; Greenland, DJ. 1981. Soil fertility capability assessment for use in the humid tropics. *Characterization of Soils in Relation to their Management for Crop Production*. Clarendon Press, London. 254–261 p.

Burt, R. 2004. *Soil survey laboratory methods manual*. USDA, Natural Resources Conservation Service. Soil survey investigations report No. 42. Ver 4. US. 700 p.

Bustillo, MA. 1989. Las rocas silíceas como materia prima en la industria actual. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 100-6. 170-179 p.

Caner, L; Radtke, LM; Vignol-Lelarge, ML; Inda, AV; Bortoluzzi, EC; Mexias, AS. 2014. Basalt and rhyo-dacite weathering and soil clay formation under subtropical climate in southern Brazil. *Geoderma*. 235, 100–112 p.

Camacho, ME; Mata, R; Barrantes-Viquez, M; Alvarado, A. 2021. Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. *Catena* 197. 15 p.

Carlson, DH; Plummer, CC; Hammersley, L. 2008. *Physical geology, earth revealed*. McGraw-Hill. New York. 1200 p.

Carter, MR. 1993. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis publishers, US. 823 p.

CATIE-ISRIC. 1994. *Soil Reference Profiles of Costa Rica. Field and Analytical Data. Country Report 12*.

Chesworth, W. 2008. *Encyclopedia of Soil Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht.

Coleman, M. 2016. *Lo que las rocas sedimentarias nos enseñan sobre la Tierra*. 1 Ed. The Rosen Publishing Group. New York. 240 p.

Conti, ME. 2007. *Principios de edafología con énfasis en suelos argentinos*. 2 Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 430 p.

da Silva, CP; Gomes de Almeida, B; Gomes de Almeida, R; de Alencar, TL; Rocha Lobato, MG; de Sousa Oliveira, L; da Silva Souza, L; da Silva Souza, MC; Anunciato Mota, JC. 2020. Cohesive character in Alfisols, Ultisol and Oxisols in northeast of Brazil: Relationship with tensile strength and particle size. Volume 23. doi.org/10.1016/j.geodrs. 2020. E00341.

Das, B. 2015. *Principles of foundation engineering*. Cengage learning.

Deer, WA; Howie, RA; Zussman, T. 1975. Rock-forming minerals. Vol. 3. Longmans, Green and Co. Ltd., London.

Denef, K; Six, J; Merckx, R; Paustian, K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant and Soil*. 246 (2), 185–200. <http://www.jstor.org/stable/24129127>

Duchaufour, P. 1982. Sesquioxide-rich soils. In: *Pedology*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-6003-2_13

Elizalde, G. 2002. Alteración de Minerales. Universidad Central de Venezuela. Postgrado en Ciencia del Suelo. 36 p.

Espitia, CJ; Quintero, J; Rodríguez, A; Bernal, FI; Romero, F; Mojica, J; Cabezas, H; Hernández, M; Pachón, M; Múnera, MH; Ramírez, J. 2003. Catálogo de propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las arcillas para cerámica roja en los centros urbanos de Medellín, Ibagué y Sabana de Bogotá. Ministerio de Minas y Energía. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Bogotá, Colombia. 203 p.

Firoozi, AA; Firoozi, AA; Baghini, MS; 2016. A review of clayey soils. *Asian Journal of Applied Sciences*. Volume 04. Issue 06. 1319-1330 p.

Foley, NK. 1999. Environmental characteristics of clays and clay mineral deposits. U.S. Geological Survey. National Center Reston, VA. 3 p.

Fontes, MPF; Weed, SB. 1991. Iron oxides in selected Brazilian oxisols: I. Mineralogy. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 55, 1143–1149 p.

Forsythe, W. 2002. Parámetros ambientales que afectan la temperatura del suelo en Turrialba, Costa Rica y sus consecuencias para la producción de cultivos. *Agronomía Costarricense*. 26 (1): 43-62 p.

Gasparini, AS; Fontes, MPF; Pacheco, AA; Ker, JC. 2022. Gibbsite Crystallinity and Morphology in Ferralsols and Bauxites. *Minerals* 2022. 12, 1441. <https://doi.org/10.3390/min12111441>

Gómez, VO; Chinchilla, M. 2005. Estudio taxonómico y mineralógico de los suelos de la cuenca del río Térraba a escala 1:50.000, provincias de Puntarenas y San José. MAG/ICE. San José, CR. 226 p.

González, M. 2017. Una aproximación al producto mineralógico del ambiente edáfico por la acción de los elementos climáticos. *Terra Nueva Etapa*. Vol. XXXIII. Núm. 54. Julio-Diciembre. 189-205 p.

González-Bonorino, F. 1966. Soil clay mineralogy of the Pampa plains, Argentina. *Journal of sedimentary research*. Vol. 36. 4. 1026-1035 p.

Goldich, SS. 1938. A study in rock-weathering. *The Journal of Geology*, 46 (1), 17–58. doi:10.1086/624619

Goldschmidt, V. 1937. The principle of distribution of chemical elements in minerals and rocks *J. Chem. Soc.* 665-673 p.

Grim, RA. 1968. *Clay Mineralogy*, Edit. McGraw-Hill, New York.

Hultine, KR; Koepke, DF; Pockman, WT; Fravolini, A; Sperry, JS; Williams, DG. 2005. Influence of soil texture on hydraulic properties and water relations of dominant warm-desert phreatophyte. *Tree physiology*. 26. 313 - 323 p.

Ibáñez, S; Gisbert, JM; Moreno, H. 2011. *Filosilicatos 2:1*. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal. 12 p.

Imbellone, PA; Aguilera, EY; Beilinson, E. 2017. Suelos y Geología Argentina: Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. Universidad Nacional de Avellaneda Ediciones. Avellaneda, Argentina. 84-101 p.

INDER (Instituto de Desarrollo Rural). 2014. Región Brunca. Territorio Buenos Aires – Coto Brus. Informe de caracterización del territorio. San José, Costa Rica. 71 p.

Jelic, MZ; Milivojevic, JZ; Trifunovic, SR; Dalovic, IG; Milosev, DS; Seremesic, SI. 2011. Distribution and forms of iron in the Vertisols of Serbia. J. Serbian Chem. Soc. 76 (5): 781-794 p.

Jury, WA; Gardner, WR; Gardner, WH. 1991. Soil Physics. John Wiley, New York, 328 p.

Ker, JC. 1997. Latossolos do Brasil: Uma Revisão. Geonomos- 5, 17–40 p.

Ker, JC; Curi, N; Schaefer, CE; Vidal-Torrado, P. 2015. Pedología: fundamentos. Sociedade Brasileira De Ciencia Do Solo. Viscosa, Minas Gerais. 343 p.

Kesel, RH; Spicer, BE. 1985. Geomorphologic relationships and ages of soils on alluvial fans in the río General Valley. Costa Rica. Catena. 12: 149–166 p.

Lansu, A. 1988. Soil structure under four land use types in the settlement Neguev, Atlantic zone of Costa Rica. 131 CATIE-AUW-MAG. 131 p.

Latham, M. 1982. French soil classifications and their application in the South Pacific Islands. Proceedings of South Pacific Regional Forum on Soil Taxonomy, Suva, Fiji, 2-13 p.

Leão, TP. 2016. Particle size distribution of Oxisols in Brazil. Geoderma Regional. Volume 7, Issue 2. 216-222 p.

Lindholm, R. 1987. Mineral identification using X-ray diffraction. En: A Practical Approach to Sedimentology. Springer. Dordrecht. 124-153 p.

Lund, LJ; Adriano, DC; Pratt, PF. 1974. Nitrate Concentrations in Deep Soil Cores as Related to Soil Profile Characteristics. *Journal of Environmental Quality*. 3: 78-82 p. <https://doi.org/10.2134/jeq1974.00472425000300010021x>

Macedo, J; Bryant, RB. 1987. Morphology, Mineralogy, and Genesis of a Hydrosequence of Oxisols in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 51: 690–698 p. doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100030025x

Macías-Vázquez, F. 1981. Formation of gibbsite in soils and saprolites of temperate humid zones. *Clay Miner.* 16, 43–52 p.

Maniyunda, LM; Raji, BA; Odunze, AC; Malgwi, WB. 2015. Forms and content of sesquioxides in soils on basement complexes of northern Guinea savanna of Nigeria. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. Vol. 6 (6). 148-157 p. [doi 10.5897/JSSEM13.0428](https://doi.org/10.5897/JSSEM13.0428)

Martín-García, JM; Márquez, R; Delgado, G; Sánchez-Marañón, M; Delgado, R. 2015. Relationships between quartz weathering and soil type (Entisol, Inceptisol and Alfisol) in Sierra Nevada (southeast Spain). *Eur J Soil Sci*, 66: 179-193 p. <https://doi.org/10.1111/ejss.12214>

Mibei, G. 2014. Introduction to types and classification of rocks. Presented at Short Course IX on Exploration for Geothermal Resources, Organized by UNU-GTP, GDC and Ken Gen, at Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya, Nov. 2-24 p.

Moore, D; Reynolds, RC. 1997. X-ray diffraction and the Identification and analysis of clay minerals, 2 Ed. Oxford University Press, New York.

Moscote, YP; Morón, JA; Madiedo, GC; Rojas, EE; Córdoba, AJ; Manco, DC. 2018. Evidencias mineralógicas y geoquímicas de las manifestaciones de hierro hospedadas en La Unidad Riodacita de los Tábanos sector de Corral de Piedras, San Juan del Cesar, La Guajira. *Prospectiva*. Vol. 16 - No. 1. Enero–Junio. 67–75 p.

Muggler, CC; Pape, TH; Buurman, P. 1997. Laser grain-size determination in soil genetic studies 2. Clay content, clay formation, and aggregation in some brazilian oxisols. *Soil Science*. 162 (3): 219-228 p.

Nanzyo, M; Kanno, H. 2018. *Inorganic Constituents in Soil: Basics and visuals*. Springer Open. Springer Singapore 178 p.

Ndzana, GM; Huang, L; Zhang, Z; Zhu, J; Liu, F; Bhattacharyya, R. 2019. The transformation of clay minerals in the particle size fractions of two soils from different latitude in China. *CATENA*. Volume 175. 317-328 p. doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.026.

Nurcholis, M. 2010. Development of Halloysite/Smectite Mixed Layer Mineral in Paleudult of Java Island. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. August 2010, Brisbane, Australia. 47–49 p.

Obando, LG; Kussmaul, S. 2009. Mapa geológico de la hoja Buenos Aires, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. 41: 2 p.

Orozco-Centeno, WP; Branch, JW; Jiménez-Builes, JA. 2014. Clasificación de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas en secciones delgadas a través programación estructurada. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, Núm. 36. 5-9 p.

Orrillo, M. 2014. Clasificación geoquímica de Goldschmidt. *Cristalografía - Ingeniería de minas*. Universidad Nacional de Cajarma.

Osodeke, VE; Nwotiti, IL; Nuga, BO. 2005. Sesquioxides distribution along a toposequence in Umudike area of Southeastern Nigeria. *Electr. J. Environ. Agric. Food Chem.* 4 (6): 1117-1124 p.

Pacheco, R. 1990. El manejo de suelos de baja fertilidad con énfasis en los Ultisoles del Valle del General. 1 Seminario sobre el Manejo de Suelos Tropicales: Posibilidades y limitaciones ecológicas, GOETHEPRODAF (GTZ) - UNED (PEA). San José, Costa Rica. 16 p.

Putnis, A; Austrheim. H. 2010. Fluid-induced processes: metasomatism and metamorphism. *Geofluids.* 10. 254–269 p.

Riedmüller, G. 1978. Neoformations and transformations of clay minerals in tectonic shear zones, *TMPM Tschermaks Min. Petr. Mitt.* 25, 219–242 p.

Rodríguez, Y. 2018. Estudio del efecto de la modificación química de vermiculita (VMC) y la procesabilidad de nanocompuestos de almidón termoplástico (ATP)/vermiculita. Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Tecnología de Polímeros. Saltillo, Coahuila. Mexico. 85 p.

Rosenqvist, J. 2002. Surface chemistry of Al and Si (hydr) oxides, with emphasis on nano-sized gibbsite (α -Al (OH)₃). Department of Chemistry, Inorganic Chemistry. Umeå University. Umeå, Sweden. 73 p.

Salgado de la Parra, PC. 2019. Herencia mineralógica del material parental en los filosilicatos secundarios presentes en suelos vitivinícolas de la zona central de Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento Ciencias de la Tierra. Concepción, Chile. 205 p.

Schaefer, C; Fabris, JM; Ker, J. 2008. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): A review. *Clay Minerals*, 43 (1), 137-154. doi:10.1180/claymin.2008.043.1.11

Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE. Natl. Soil Surv. Ctr., Lincoln, NE (September).

Shabbir, S; Samira, O. 2022. Families and Series Differentiae. In: Kuwait Soil Taxonomy. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95297-6_4

Shirozu, H. 1988. Introduction to clay mineralogy. Fundamentals for clay science, Asakura Pub. Japan, 185 p.

Sirivitmaitrie, C; Puppala, AJ; Chikyala, V; Saride, S; Hoyos, LR. 2008. Combined lime and cement treatment of expansive soils with low to medium soluble sulfate levels. American Society of Civil Engineers, Proceedings of the Geo Congress. 646-653 p.

Sirivitmaitrie, C; Puppala, AJ; Saride, S; Hoyos, L. 2011. Combined lime-cement stabilization for longer life of low volume roads. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2204 (1): 140-147 p.

Soca, M; Daza-Torres, CM. 2016. Evaluation of particle size fractions and doses of zeolot for agriculture. Agrobiencia. 50 (8), 965-976 p.

Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy, a basic system of soil classification of making and interpreting soils surveys. USDA-NRCS. Agriculture Handbook. No. 436, U.S. Government Printing Office, Washington, D. C.

Soil Survey Staff. 2004. Soil Survey Investigation. Report No. 42. Version 4.0. Nov. 204. 443–444 p.

Soil Survey Staff. 2022. Keys to Soil Taxonomy, 13 edition. USDA Natural Resources Conservation Service.

Sultan, K. 2006. Clay Mineralogy of Central Victorian (Creswick) Soils: Clay Mineral Contents as a Possible Tool of Environmental Indicator, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 15:4, 339-356, DOI: 10.1080/15320380600751702

Sufardi, S; Arabia, T; Khairullah, K; Apriani, I. 2021. Particle size distribution and clay minerals in dryland soils of Aceh Besar, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 922. Banda Aceh, Indonesia.

Townsend, FC; Manke, PG; Parcher, JV. 1971. The influence of sesquioxides on lateritic soil properties. Highway Research Board. 80–92 p.

USDA-SCS. 1999. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Internal Report. Washington, D. C. 754 p.

USDA-SCS. 2012. Soil Taxonomy: Soil Survey Laboratory Primary Characterization, Data of Some Costa Rican Soils. Second Edition. Lincoln, Nebraska. sp.

Velde, B. 1995. Composition and mineralogy of clay minerals. Origin and mineralogy of clays: New York, Springer-Verlag. 8–42 p.

Watanabe, T; Funakawa, S; Kosaki, T. 2010. Distribution and formation conditions of gibbsite in the upland soils of humid Asia: Japan, Thailand and Indonesia. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. August. Brisbane, Australia. 17–20 p.

Williams, H; Turner, FJ; Gilbert, CM. 1982. Petrography: An introduction to the study of rocks in thin section. WH Freeman and Company.

CAPÍTULO 5. MAPEO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS ALTAMENTE METEORIZADOS DERIVADOS DE ABANICOS ALUVIALES ANTIGUOS EN BUENOS AIRES DE PUNTARENAS, COSTA RICA.

Introducción

La variabilidad espacial del suelo ocurre de manera natural por causa de los factores y procesos de formación, como lo pueden ser el relieve, la geomorfología o el microclima de un área determinada; lo que da como resultado cambios en la cobertura vegetal y en procesos de erosión y deposición de materiales, los cuales determinan la uniformidad del suelo (Zhao *et al.* 2007). La asociación de conjuntos de datos espacialmente relacionados, que buscan la representación y simplificación de detalles para propósitos específicos, dan como resultado mapas (Lapaine *et al.* 2021).

Los creadores de mapas traducen la realidad geográfica en símbolos cartográficos, ya que los mapas son la forma más eficaz y eficiente de transmitir y de proporcionar datos e información espacial (Elzakker 2004). El mapa geográfico no sólo da una imagen de la disposición geográfica de los objetos, fenómenos y procesos, sino que también permite el estudio de las regularidades de la propia disposición de un determinado fenómeno u objeto de interés, su correlaciones e interconexiones y dan la base científica para la elaboración de una tesis sobre transformación de la mirada geográfica del territorio observado, lo que resulta útil para la toma de decisiones (Ikonovic 2001).

El mapeo de suelos o mapeo pedométrico, es un proceso que implica la recolección de información espacial, mediante la integración de trabajo de campo y la obtención de muestras para generar datos de laboratorio, lo que proporciona información detallada sobre diferentes propiedades del suelo, tales como pH, contenido de humedad, contenido de carbono orgánico, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, las concentraciones de nutrientes en el suelo, entre muchas otras (Lenka y Divya 2020).

En el caso de mapas de suelos, una unidad de mapa de suelos corresponde a una visualización espacial y cartográfica que representa un polipodón y es la estructura del mapa de suelos que

se puede definir e introducir a través de unidades taxonómicas (Sarmadian *et al.* 2014). Estas unidades taxonómicas, como mencionan Aberegg *et al.* (2009), pueden ser generadas a partir de información digital básica, como los modelos de elevación digital, los mapas geológicos, información sobre precipitación y mapas de vegetación, son la base para el modelado de mapas de suelos, que se puede utilizar para predecir las propiedades del suelo y conocer su distribución espacial (Scull *et al.* 2003).

La información recopilada en un levantamiento de suelos ayuda en el desarrollo de planes de uso de la tierra y se puede utilizar para evaluar y predecir los efectos del uso de la tierra en el medio ambiente; de manera que los mapas de suelos constan de muchas delineaciones individuales que muestran la ubicación y extensión de diferentes suelos (USDA 2017).

Entre las décadas de 1990 y 2000, surgieron sofisticados Sistemas de Información Geográfica (SIG) a través de innovación tecnológica, especialmente en informática (Hanchard 2018). Con el surgimiento de los SIG, se dio la transición del mapeo analítico al mapeo digital, lo que revolucionó la cartografía, ya que esto permitió el amplio uso y distribución de mapas digitales (Koyel y Vibhash 2021). El mapeo digital de suelos resulta de la generación de datos georeferenciados de suelos, basados en relaciones cuantitativas entre datos ambientales espacialmente explícitos y mediciones realizados en campo y laboratorio (McBratney *et al.* 2003). Los mapas resultantes ilustran la distribución espacial de distintas clases o propiedades del suelo, refinar o actualizar los estudios de suelos existentes, generar interpretaciones del suelo y evaluar el riesgo (Carré *et al.* 2007).

En 1979 el Ing. Agr. Alexis Vásquez Morera, tras una compilación de datos de la Unidad de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y otros autores, realiza el primer mapa de suelos de Costa Rica en formato analógico (figura 5.1), en el mismo se puede observar la distribución de varias clases de suelos, que fueron clasificados a nivel de suborden, según la taxonomía de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Janzen 1991). En años posteriores Acón *et al.* (1989), realizan un estudio para aumentar el nivel de detalle del mapa de suelos de costa Rica a escala 1:200.000, con esta

información se publica en 1996 el mapa de suelos elaborado por Oscar Gómez y Rodolfo Méndez (figura 5.2).

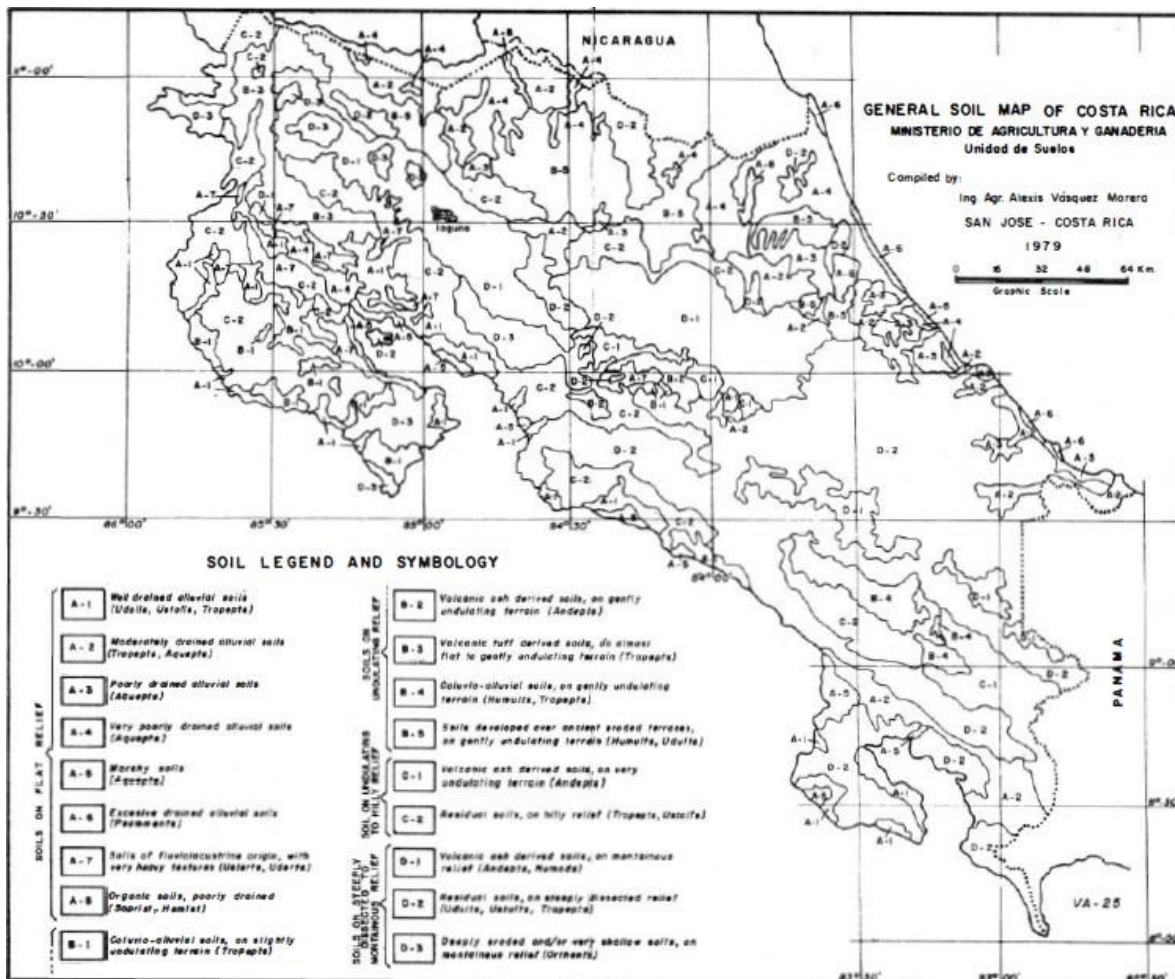


Figura 5.1. Mapa general de suelos de Costa Rica de 1979, elaborado por el Ing. Agr. Alexis Vásquez Morera (Tomado de Janzen 1991).

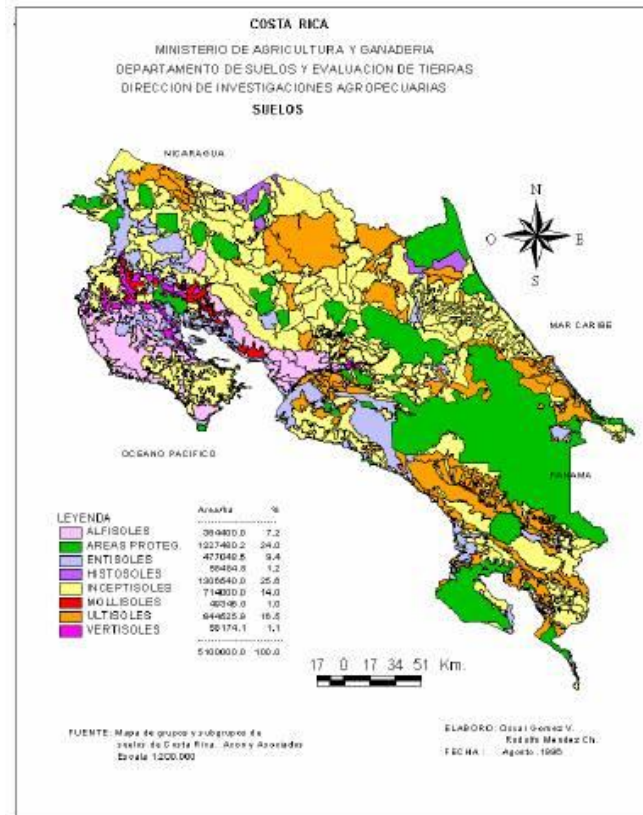


Figura 5.2. Mapa de suelos de Costa Rica de 1996, elaborado por Gómez y Méndez (1996).

En el 2012, representantes de la Universidad de Costa Rica (UCR), la Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS) y del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuario (INTA), inician un proceso de compilación, revisión, corrección y digitalización de los mapas de suelos existentes en Costa Rica, abarcando información que va desde 1975 hasta el 2012 para conformar una base de datos digitales de perfiles de suelos; es así como en 2013, se publicó un nuevo mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica a escala 1:200.000 (figura 5.3), disponible también en versión digital; este mapa que fue actualizado en 2015 con el apoyo del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) (Mata-Chinchilla y Castro-Chinchilla 2019).

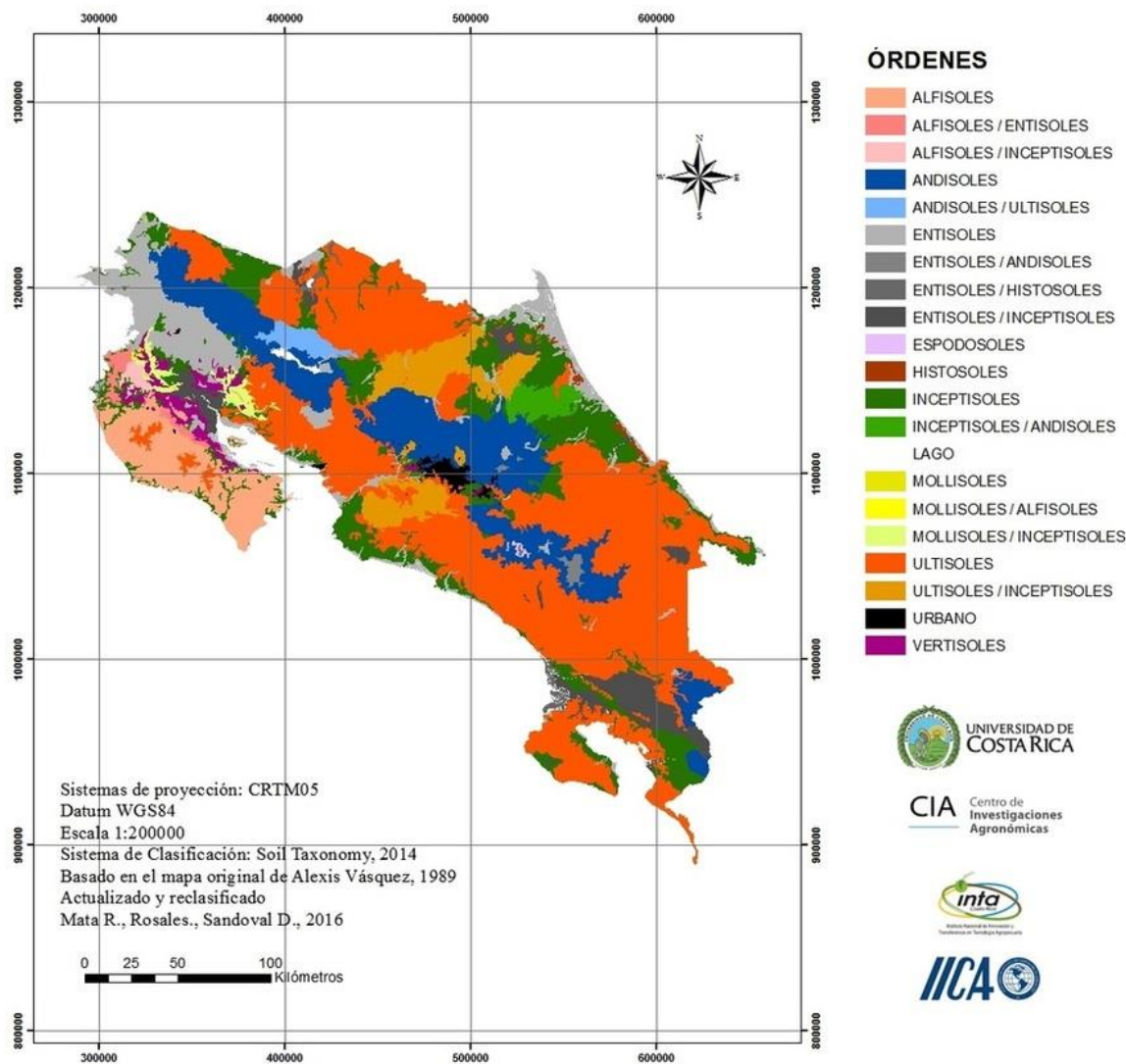


Figura 5.3. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica de 2016, elaborado por Mata *et al.* (2016).

En el año 2022 el mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica a escala 1:200.000 recibió una nueva actualización, en donde se afinaron polígonos de la Península de Nicoya, gracias al mapa realizado por el Proyecto de Cartografía Digital de Suelos de los Catones Costeros de Costa Rica (PCS) a escala 1:50.000 del INTA; y además se incluyen por primera vez en un mapa de suelos de Costa Rica, el orden de los Oxisoles en el Valle del General y piedemonte sur oeste de la Cordillera de Talamanca (figura 5.4).

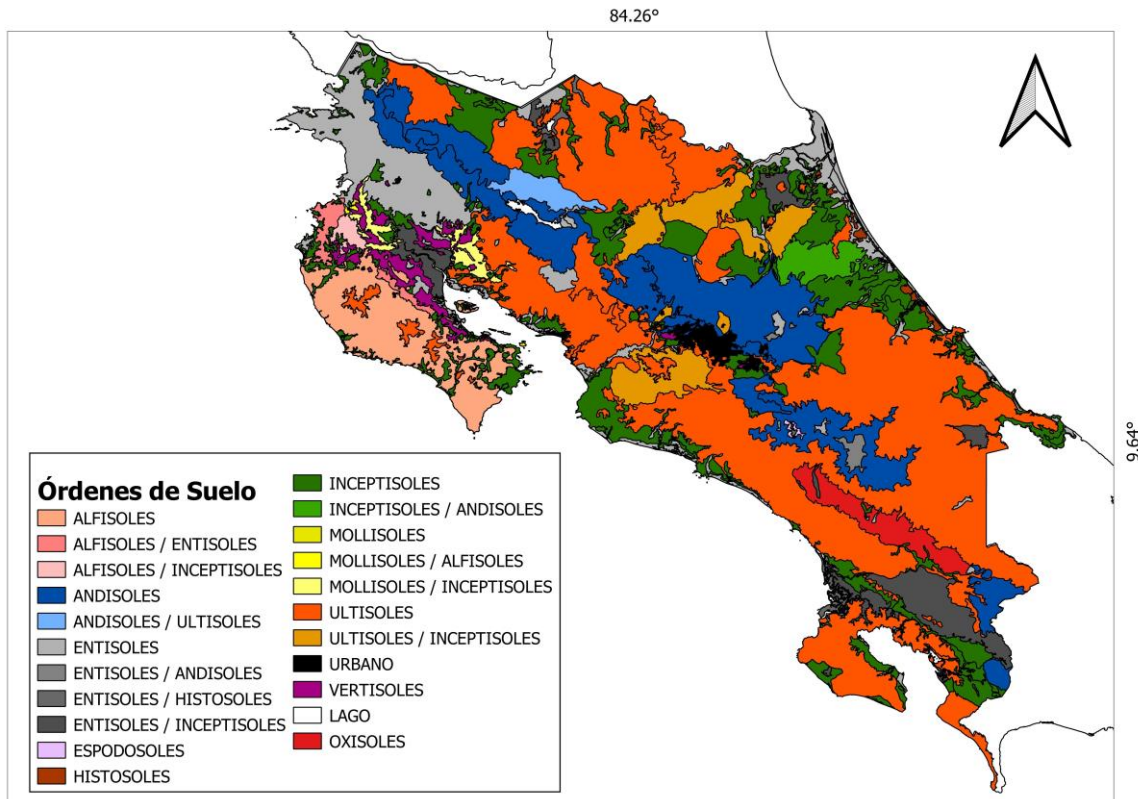


Figura 5.4. Mapa de órdenes suelos de Costa Rica de 2022, elaborado por Mata *et al.* (2022).

Ante la necesidad de comprender la forma en que varían espacialmente las propiedades y características de los suelos, y cómo sus características se adaptan a las diversas formas de investigación y utilización de los suelos (Ellis y Mellor 1995). El objetivo principal del mapeo de suelos es delimitar áreas de gestión uniformes, es decir, crear polígonos de unidades en todo el paisaje, y proporcionar a los usuarios información sobre las propiedades del suelo, las interpretaciones para estas unidades y apoyar la toma de decisiones sobre el uso y manejo del suelo (Thompson *et al.* 2012). Si una nación conoce sus suelos, está en capacidad de generar los conocimientos y servicio necesarios para ordenar racional e integralmente su patrimonio territorial; en virtud de planificar sus actividades productivas, ambientales y sociales, aprovechar sus recursos naturales para mejorar las condiciones de vida de la población, manteniendo la capacidad productiva sin perjuicio de la biodiversidad (Nieto 2014).

El objetivo de este capítulo es presentar un mapa de la distribución de los suelos en el área de estudio a escala 1:200.000, el cual sirva de base para realizar mapas a una escala más detallada, actualizar por medio de generalización el mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica; además de concientizar a empresas productoras, agricultores y población en general de Buenos Aires de Puntarenas, sobre los suelos que poseen, y que esto contribuya a darles un uso con enfoque conservacionista según sus características y propiedades, para buscar su protección y evitar su degradación.

Metodología

Área de estudio

El área de estudio se ubica al noroeste del Cantón Buenos Aires de Puntarenas, delimitada por los límites establecidos en la hoja cartográfica Buenos Aires (IGN 1980) y tomando en cuenta el mapa geológico de la hoja Buenos Aires, realizado por Obando y Kussmaul (2009) para definir los sitios de muestreo.

Trabajo de campo

Se realizó el levantamiento de transectos, compuestos por 50 observaciones simples denominados cateos de 120 cm de profundidad, realizados con un barreno tipo Edelman tipo holandés; además de 10 microcalicatas, ubicadas, considerando los abanicos aluviales y materiales descritos por Obando y Kussmaul (2009) en el mapa geológico de la hoja Buenos Aires. En cada cateo y microcalicata se tomó la ubicación, se separaron los horizontes genéticos del perfil del suelo y se caracterizó según su textura, color, entre otras características del sitio utilizando el Field Book for Describing and Sampling Soils (Schoeneberger *et al.* 2012). Con estas observaciones se determinaron pedones para realizar fosas de observación o calicatas para la descripción detallada de perfil modal del suelo. La calicata corresponde a una fosa de 1,5 m de ancho por 2,0 m de largo y 2,0 m de profundidad o hasta la profundidad que lo permita el suelo, dejando una cara para describir el perfil modal del suelo. La descripción del perfil del suelo se llevó a cabo siguiendo los lineamientos descritos en Schoeneberger *et al.* (2012), se determinó la localización geográfica, fisiografía, relieve, elevación y pendiente, erosión sufrida, fertilidad aparente, drenaje, pedregosidad, y profundidad del nivel freático. Se identificó cada horizonte y se caracterizó su espesor y

profundidad, color en húmedo y en seco con una Tabla Munsell, estructura y consistencia, porosidad y contenido y distribución de raíces, así como formaciones especiales y se tomaron muestras para la caracterización física y química de cada uno de ellos (Schoeneberger *et al.* 2012).

Se describieron y muestrearon 22 calicatas en el área de estudio, las cuales abarcan los abanicos aluviales río San Juancito, río Convento, río Cacao, Cordoncillo, río Ángel, Llano Bonito, río Cañas, quebrada Juntas, quebrada Palma y Buenos Aires, y en los materiales intrusivos y abanicos del grupo granito-gabro Talamanca, materiales de la formación Curré.

Clasificación taxonómica

Con los datos de los análisis de laboratorio, tanto físicos como químicos, y las características morfológicas de los perfiles, se utilizó la Clave para la Taxonomía de Suelos en su décimo tercera edición del año 2022, partiendo de la definición de los horizontes diagnóstico compuestos por epipedones y endopedones, para con ellos establecer el orden y siguiendo los criterios y parámetros establecidos en la taxonomía, para continuar con la definición del suborden, el gran grupo, hasta nivel de subgrupo (Soil Survey Staff 2022).

Proceso de mapeo

Se utilizó como punto de partida la información recolectada de los cateos, microcalicatas, los 22 perfiles de suelos analizados en esta investigación y 27 perfiles de la base de datos de perfiles de suelo asociada al mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica. Los perfiles de la base de datos pasaron por un proceso de revisión, verificación y en el caso de ser necesario, se reclasificación a nivel de subgrupo, previamente a ser utilizados en el proceso de mapeo. En la figura 5.5 se puede observar la distribución de los perfiles realizados en el área de estudio, así como la ubicación de los perfiles modales de suelos de la base de datos de perfiles de suelo de Costa Rica, las observaciones simples y microcalicatas realizadas. En total, se contó 109 observaciones de suelos distribuidas en 531,4 km² que conforman el área de estudio, para una escala de trabajo de 1:200.000.

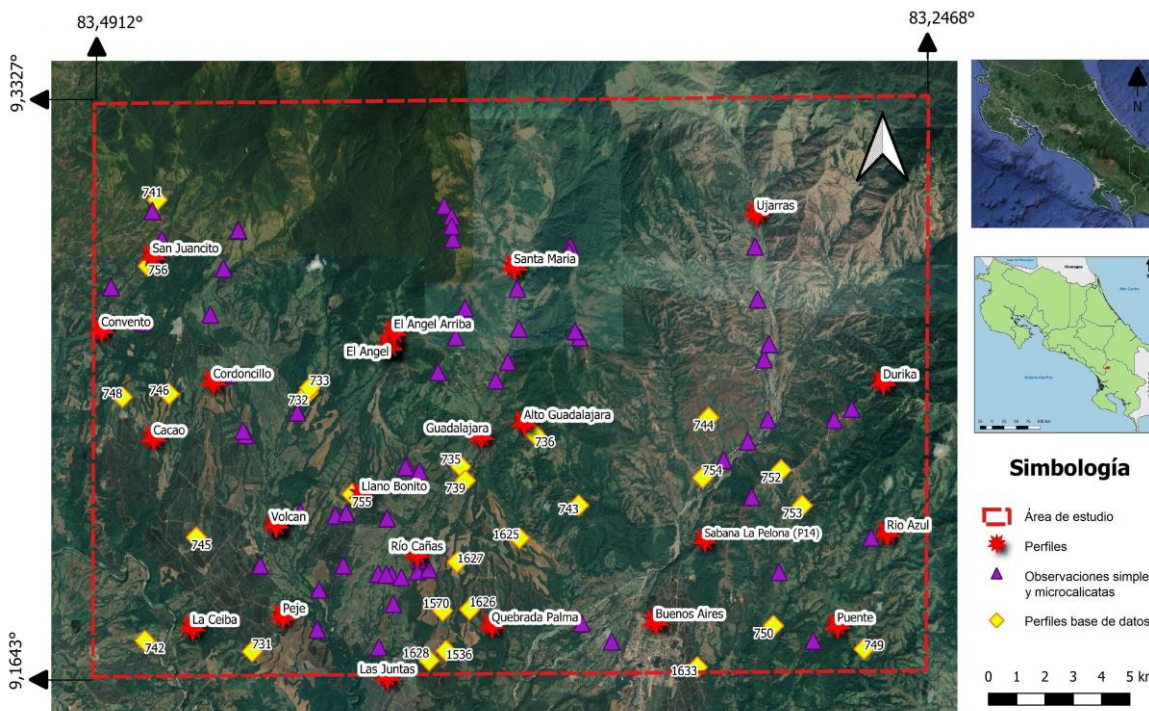


Figura 5.5. Ubicación de los pedones, observaciones simples, microcalicatas y perfiles de suelos de la base de datos del mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica (los números corresponden a su ID en la base de datos).

Las unidades cartográficas se definieron utilizando técnicas de fotointerpretación mediante imágenes satelitales; además de otras herramientas disponibles como Google Satellite, Google Earth, el mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica, el mapa geológico de la hoja Buenos Aires, el mapa geológico del flanco Pacífico Central de la Cordillera de Talamanca, el mapa geomorfológico de la hoja Talamanca, la hoja cartográfica Buenos Aires, y capas temáticas del Atlas Digital de Costa Rica (2014). Los archivos fueron integrados en un Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante el software libre QGIS en su versión Hannover 3.16. Para la definición de unidades cartográficas se agruparon perfiles de suelos con características morfológicas, físicas y químicas similares. Se inició definiendo los órdenes de suelos, luego se fue detallando más para pasar a subórdenes, después a grandes grupos, subgrupos y finalmente familias de suelos. Con el fin de verificar y comprobar los límites entre las unidades cartográficas definidas y para dar validez al contenido pedológico a cada una de ellas, se realizó una de comprobación de campo.

Resultados

A continuación, se resume la información de áreas en km² y el porcentaje (%) respecto al área total de cada orden, suborden, gran grupo y subgrupo de suelos mapeados cuadro (5.1). Los Oxisoles son el orden de suelos de mayor presencia en el área de estudio, ocupando unos 292,0 km², lo que representa un 55,0 % del área total; estos suelos se distribuyen principalmente en los abanicos aluviales y piedemonte de la Cordillera de Talamanca, siendo cortados por los ríos Volcán, Ángel, Cañas y Ceibo. Los Ultisoles cubren 151,9 km² (28,6 %), se encuentran en la parte media del área de estudio, al este y también se encuentran en un menor porcentaje en la parte sur del mapa, y su presencia se puede asociar a la morfología de las partes basales de los abanicos aluviales, a la dinámica del río General y a la dinámica que se da por la unión de los ríos Volcán, Ángel y Cañas. Los Entisoles se encuentran en las márgenes de los ríos General, Volcán, Ángel, Cañas y Ceibo y a los aluviones que han formado a lo largo del tiempo; estos suelos representan un 8,6 % del área de estudio, cubriendo 45,6 km². Se da una asociación de órdenes de suelos entre Ultisoles e Inceptisoles que ocupa un área de 38,4 km² (7,7 %), los límites de este polígono se establecieron mediante la verificación de observaciones de campo (cateos), en los alrededores del ápice del río Cañas al oeste y en Santa María del lado este. En la parte norte del mapa se presenta un polígono de Andisoles que surge como referencia del mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica (Mata *et al.* 2022); que para esta investigación fue modificado de manera que este orden se presente más hacia el norte de la Cordillera de Talamanca, ya que en campo hasta donde se logró acceder no se encontraron Andisoles como tal, pero se encontraron áreas de deposición con suelos oscuros que dan positivo a la prueba de NaF para presencia de ceniza volcánica, lo que hace suponer que existan áreas con Andisoles en las partes altas de dicha cordillera, y que para el área de estudio ocupan un 0,6 % (3,1 km²).

El mapa de subórdenes (figura 5.6) muestra los mismos valores de área que el mapa de órdenes (figura 5.5), ya que todos los Oxisoles pertenecen al suborden de los Ustox, los Ultisoles a los Humults, los Entisoles a los Orthents, los Andisoles a los Udands, y la asociación de Ultisoles e Inceptisoles a nivel de subgrupo corresponde a Humults/Udepts.

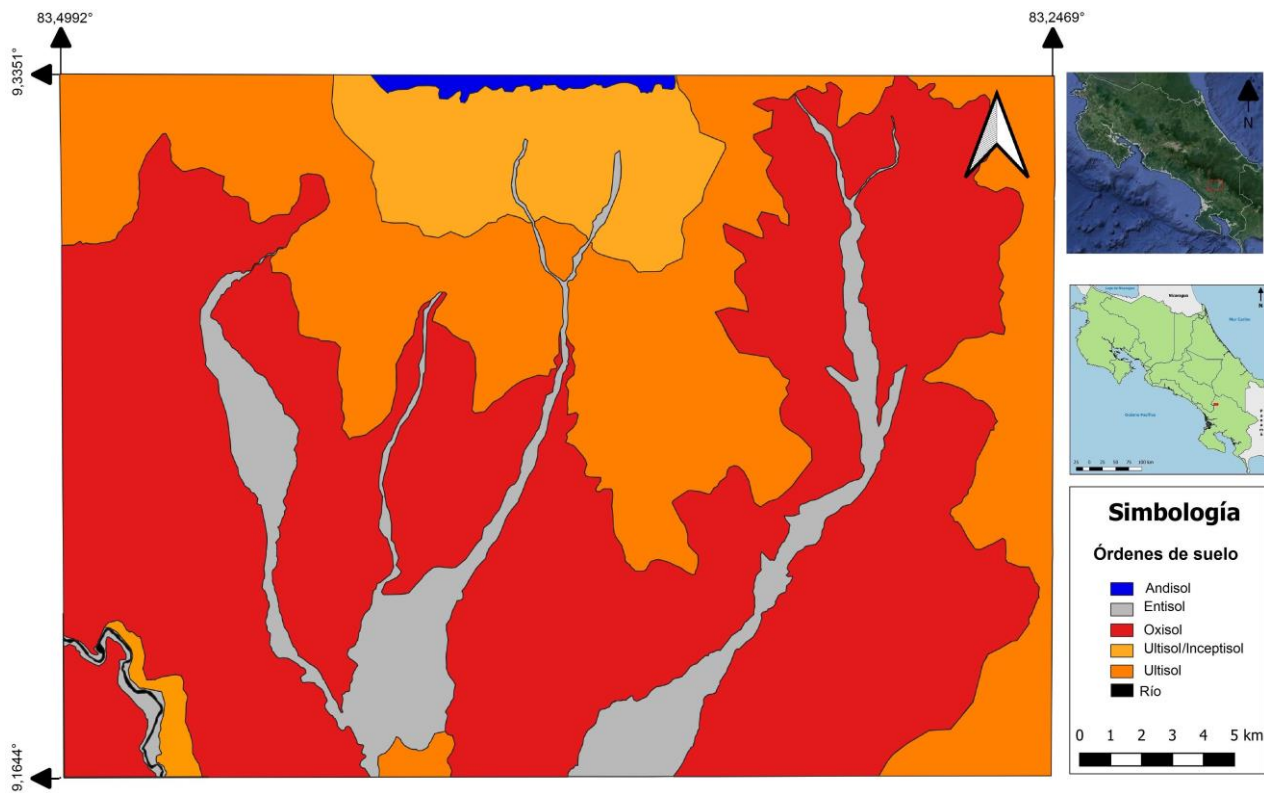


Figura 5.5. Mapa de órdenes suelos de la hoja Buenos Aires (escala 1:200.000).

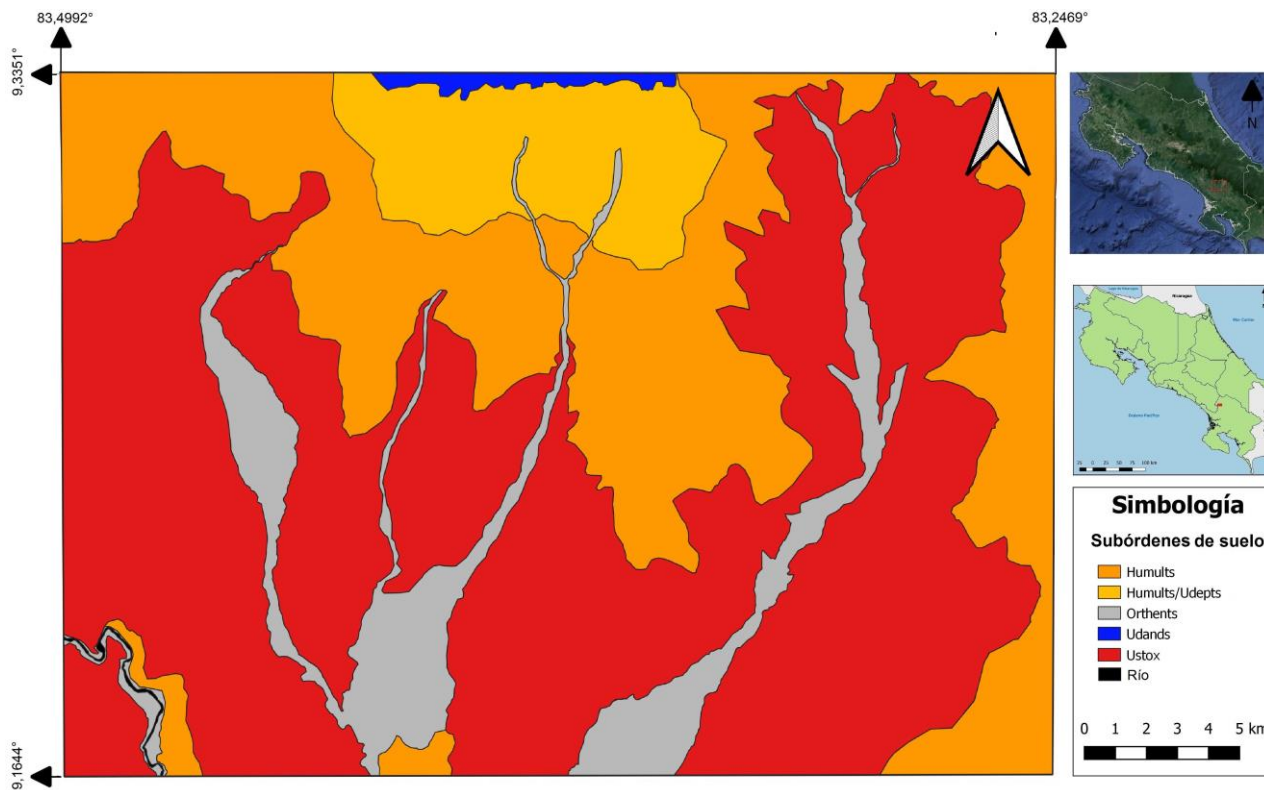


Figura 5.6. Mapa de subórdenes suelos de la hoja Buenos Aires (escala 1:200.000).

A nivel de grandes grupos dentro de los Oxisoles, los Kandiuustox fueron los más abundantes ocupando un área de 204,9 km² (38,6 %), se encuentran distribuidos en los abanicos aluviales; seguidos por los Acrustox con 17,2 km² (3,2 %) en parte del abanico del río Cañas y San Juancito; y por los Eustrustox con 6,9 km² (1,3 %) al otro lado del río General, para este último gran grupo se contó con información de un perfil de la base de datos que fue revisado y reclasificado, no se logró realizar más observaciones por la complejidad de llegar a esa zona. En el caso de los Humults, los Haplohumults se ubican en la parte media del área de estudio ocupando 190,5 km² (35,8 %) y Palehumults en la parte sur y noreste en un área de 24,2 km² (4,6 %). Los Entisoles a nivel de gran grupo se clasificaron como Ustorthents y ocupan un área de 45,6 km² (8,6 %). Ultisoles e Inceptisoles a nivel de gran grupo corresponden a Haplohumults/Humudepts ocupan un área de 38,4 km² (7,2 %). Y los Andisoles a nivel de gran grupo se clasificaron como Hapludands y ocupan 3,1 km² (0,6 %).

La distribución de los grandes grupos de suelos se puede observar en la figura 5.7. En cuanto a los subgrupos en la figura 5.8 se muestra la distribución de suelos dentro de los Kandiuustox se encontraron los Typic Kandiuustox de forma independiente con un área de 102,7 km² (19,3%) y en asociación con los Humic Rhodic Kandiuustox ocupando un área de 110,8 km² (20,8 %); Lithic Kandiuustox ubicados en los abanicos Cordoncillo y Llano Bonito en un área de 34,1 km² (6,4%); y la asociación entre Rhodic Kandiuustox y Humic Kandiuustox con 11,6 km² (2,2 %). En los Acrustox se encontró una asociación entre los subgrupos Humic Acrustox y Rhodic Acrustox con un área de 11,6 km², Humic Rhodic Acrustox con 5,6 km² (1,1 %) y Humic Acustox con 1,2 km² (0,2 %). Para los Kandiuustalfic Eustrustox el área corresponde a 6,9 km² (1,3 %). En Haplohumults se encontraron los subgrupos Andic y Ustic con un área de 67,7 km² (12,7 %) y 59,8 km² (11,3 %) respectivamente; y Palehumults en el subgrupo Typic con 19,3 km² (3,6 %) y Ustic con 4,9 km² (0,9 %). En los Ustorthents los Lithic ocupan la mayor área con 39,0 km² (7,3 %), luego la asociación Typic Ustorthents y Lithic Ustorthents con 6,4 km² (1,2 %); y una pequeña área de Vitrandic Ustorthents de 0,2 km² (menor a 0,01 %). Una asociación Andic Haplohumults y Typic Humudepts ocupa un área de 38,4 km² (7,2 %). Y la asociación Lithic Hapludands con Typic Hapludands ocupa un área de 3,1 km² (0,6 %).

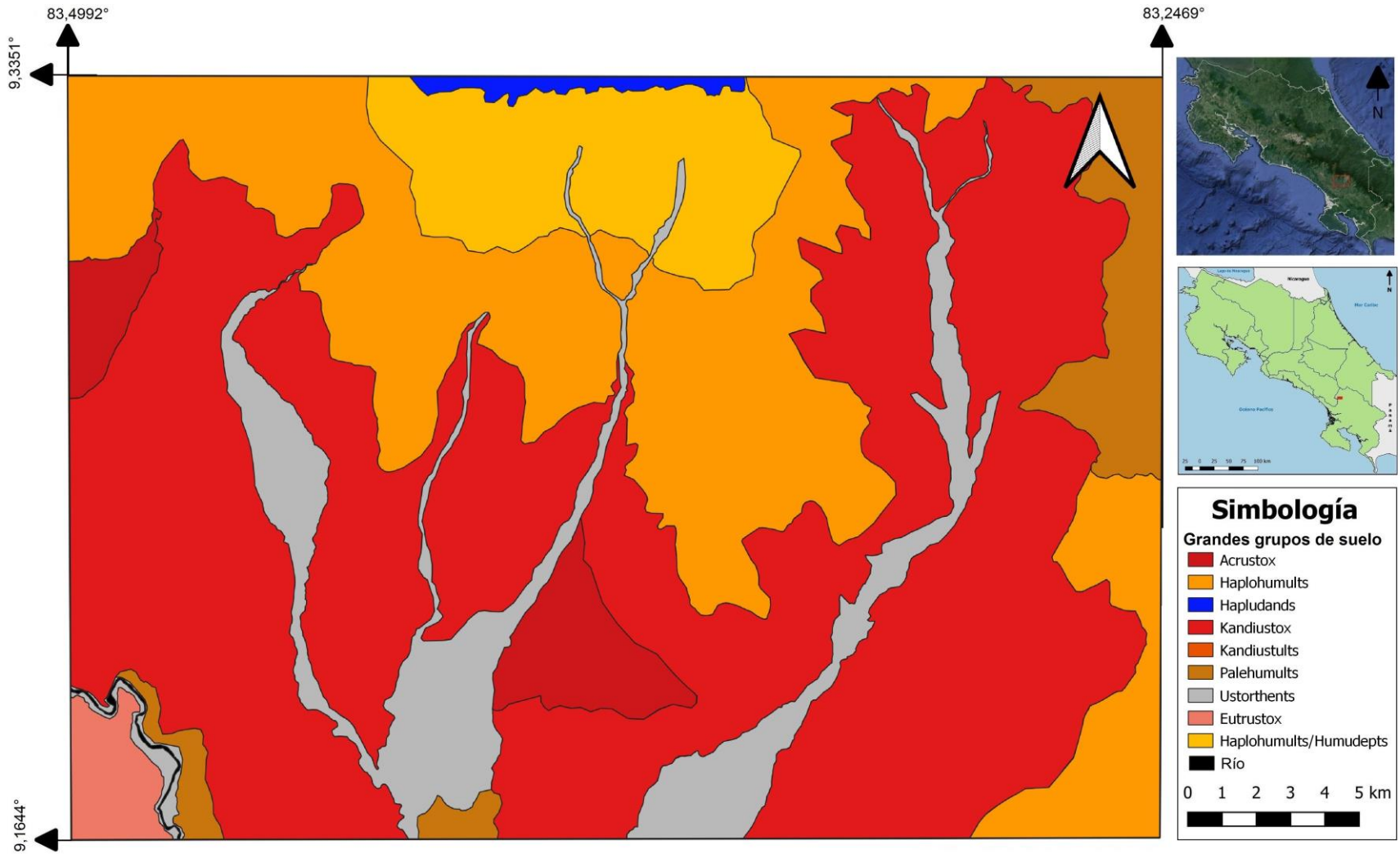


Figura 5.7. Mapa de grandes grupos de suelos de la hoja Buenos Aires (escala 1:200.000).

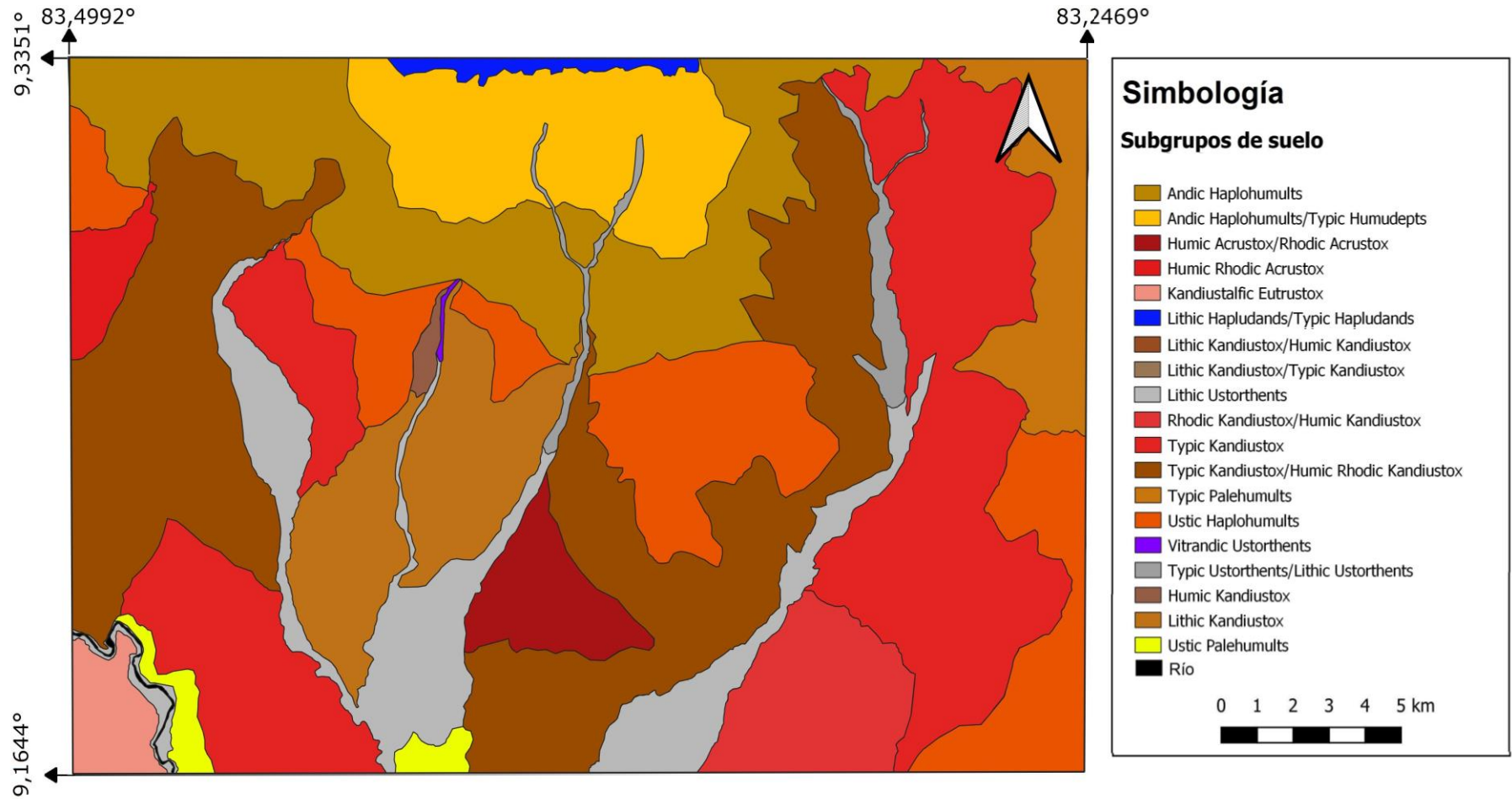


Figura 5.8. Mapa de subgrupos de suelos de la hoja Buenos Aires (escala 1:200.000).

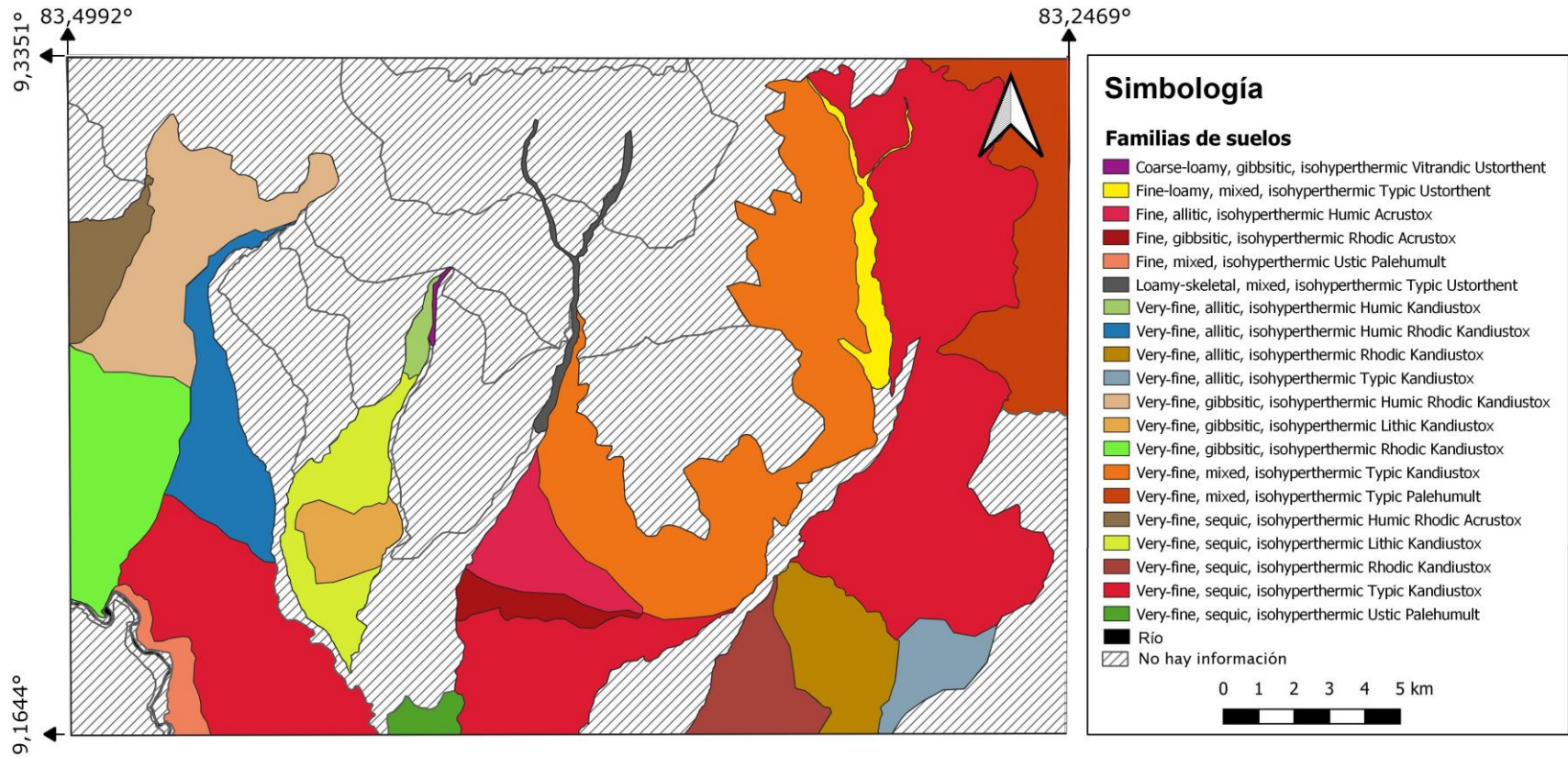


Figura 5.9. Mapa de familias de suelos de la hoja Buenos Aires (escala 1:200.000).

Cuadro 5.1. Área (km²) y porcentaje correspondiente (%) según orden, suborden, gran grupo y subgrupo de los suelos clasificados y mapeados en el área de estudio en Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.

Orden	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Suborden	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Gran grupo	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Subgrupo	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Oxisol	292,0	55,0	Ustox	292,0	55,0	Kandiustox	204,9	38,6	Typic Kandiuustox/ Humic Rhodic Kandiuustox	110,8	20,8
									Typic Kandiuustox	102,7	19,3
									Lithic Kandiuustox	34,1	6,4
									Rhodic Kandiuustox/ Humic Kandiuustox	19,2	3,6
									Humic Acrustox/ Rhodic Acrustox	11,6	2,2
									Humic Kandiuustox	1,2	0,2
									Humic Rhodic Acrustox	5,6	1,1
									Eustrustox	6,9	1,3
									Kandiustalfic Eustrustox	6,9	1,3
									Ultisol	151,9	28,6
Ustic Haplohumults	59,8	11,3									
Typic Palehumults	19,3	3,6									
Ustic Palehumults	4,9	0,9									
Entisol	45,6	8,6	Orthents	45,6	8,6	Ustorthents	45,6	8,6	Lithic Ustorthents	39,0	7,3
									Vitrandic Ustorthents	0,2	0,0
									Typic Ustorthents/ Lithic Ustorthents	6,4	1,2
Ultisol/ Inceptisol	38,4	7,2	Humults/ Udepts	38,4	7,2	Haplohumults/ Humudepts	38,4	7,2	Andic Haplohumults/ Typic Humudepts	38,4	7,2
Andisol	3,1	0,6	Udands	3,1	0,6	Hapludands	3,1	0,6	Lithic Hapludands/ Typic Hapludands	3,1	0,6

Clasificación según la Clave para la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 2022).

Taxonómicamente se encontraron 22 familias de suelos que abarcan un total de 286,6 km² de los 531,4 km² del área de estudio, lo que representa un 54 % del área total. Lo anterior debido a que no se posee información suficiente en lo referente a mineralogía, para representar la totalidad del área de estudio en un mapa a nivel de familia mineralógica. Cada uno de los perfiles analizados en esta investigación es representativo de un área específica como se muestra en la figura 5.9, el área correspondiente a cada perfil se puede observar en el cuadro 5.2.

Cuadro 5.2. Área (km²) y porcentaje correspondiente (%) al nivel de familia mineralógica de los suelos clasificados y mapeados en el área de estudio en Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica.

Familia	Área (km²)	Porcentaje (%)
Very-fine, allitic, isohyperthermic Humic Rhodic Kandiustox	1,2	4,2
Very-fine, gibbsitic, isohyperthermic Humic Rhodic Kandiustox	19,1	6,7
Very-fine, allitic, isohyperthermic Typic Kandiustox	5,3	1,8
Very-fine, sequic, isohyperthermic Typic Kandiustox	62,2	21,7
Very-fine, mixed, isohyperthermic Typic Kandiustox	47,4	16,5
Very-fine, sequic, isohyperthermic Typic Kandiustox	24,2	8,4
Very-fine, sequic, isohyperthermic Typic Kandiustox	15,6	5,4
Very-fine, sequic, isohyperthermic Lithic Kandiustox	10,4	3,6
Very-fine, gibbsitic, isohyperthermic Lithic Kandiustox	4,9	1,7
Very-fine, allitic, isohyperthermic Rhodic Kandiustox	10,9	3,8
Very-fine, sequic, isohyperthermic Rhodic Kandiustox	8,3	2,9
Very-fine, gibbsitic, isohyperthermic Rhodic Kandiustox	16,8	5,9
Very-fine, allitic, isohyperthermic Humic Kandiustox	1,2	0,4
Very-fine, sequic, isohyperthermic Humic Rhodic Acrustox	5,6	1,9
Fine, allitic, isohyperthermic Humic Acrustox	8,2	2,9
Fine, gibbsitic, isohyperthermic Rhodic Acrustox	3,4	1,2
Very-fine, mixed, isohyperthermic Typic Palehumult	19,3	6,7
Fine, mixed, isohyperthermic Ustic Palehumult	3,1	1,1
Very-fine, sequic, isohyperthermic Ustic Palehumult	1,9	0,7
Fine-loamy, mixed, isohyperthermic Typic Ustorthent	4,2	1,5
Loamy-skeletal, mixed, isohyperthermic Typic Ustorthent	2,1	0,7
Coarse-loamy, gibbsitic, isohyperthermic Vitrandic Ustorthent	0,2	0,1

Clasificación según la Clave para la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff 2022).

Discusión

La operación básica de mapear suelos con objeto de registrar sus posiciones en el espacio, es un requisito previo para el desarrollo de la ciencia del suelo; la descripción y la caracterización de los perfiles del suelo son procesos en los que se establece que es el suelo y donde está localizado, con respecto a los factores ambientales (Buol *et al.* 1990). Las características fisicoquímicas del suelo se consideran similares en una misma región debido a condiciones ambientales similares. En tales circunstancias, la técnica de la geomorfología se puede utilizar para estudiar la variación de las propiedades del suelo (Sarmadian *et al.*, 2014).

Estos mapas fueron realizados con un enfoque geopedológico, establecido por primera vez por Schaetzl y Anderson (2005), con el objetivo de enfatizar la relación entre el suelo y las diferentes partes de los paisajes. Estos autores dividieron la tierra en cuatro niveles; paisaje, geología, relieve y suelos siguiendo una estructura jerárquica (Sarmadian *et al.* 2014)

Como mencionan Solano y Acuña (1993), el área de estudio debe su formación a la acción combinada de varios procesos morfogenéticos, siendo el vulcanismo y el tectonismo los de mayor relevancia, los cuales originaron una geomorfología característica, la cual ha influido en la génesis y distribución de suelos que allí se encuentran.

En los mapas elaborados se pueden observar, que los Entisoles se distribuyen en los ápices de los ríos y a lo largo de sus riberas, se extienden en las partes medias y valles, donde también se pueden encontrar Ultisoles y Oxisoles, hasta las partes más bajas y en la región de las llanuras y piedemonte, donde dominan los Oxisoles (Bajracharya 2021), similar a lo que observaron Krishnaswamy y Richter (2002) al estudiar el efecto que tiene el uso de la tierra y el avanzado estado de meteorización sobre las propiedades de algunos suelos en los abanicos aluviales del Valle del General, encontraron Entisoles en depósitos aluviales recientes, y Oxisoles y Ultisoles en superficies más antiguas y estables.

La red hidrológica en el área de estudio es muy importante, está compuesta por ríos que conforman el drenaje de la vertiente suroeste de la Cordillera de Talamanca hacia las aguas del río General; entre los ríos de mayor importancia se destacan el Ceibo, Volcán, Cañas y el Ángel, que corren sobre terrazas fluviales emplazadas en valles disectados del sistema montañoso (Solano y Acuña 1993). Los suelos al margen de estos ríos, se encuentran en terrazas bajas derivadas de aluviones recientes constituidos por detritos de origen continental o de transición (fluvio-marinos) del periodo Cuaternario (Quesada-Román 2016). Según Vásquez (1990) estos suelos pertenecen a la categoría coluvio-aluvial y ocupan áreas desde partes altas de la Cordillera de Talamanca hasta su piedemonte.

Según Kesel y Spicer (1985), el piedemonte de la Cordillera de Talamanca, donde se emplazan abanicos aluviales, está constituido por materiales que datan de al menos 7 000 años de antigüedad y se caracterizan por estar unidos por una matriz de arcillas y arenas de hasta 12 m de espesor; esta matriz, ha sufrido un proceso de meteorización intenso, bajo condiciones ambientales, responsables de la génesis de suelos altamente meteorizados como lo son los Oxisoles (Ibáñez *et al.* 2011). Estos depósitos en forma de abanicos aluviales, son resultado de la dinámica erosiva de la Cordillera de Talamanca, a través de diferentes etapas de emplazamiento y deshielo de glaciares del Pleistoceno (Bergoeing 2011); los suelos formados sobre estos materiales tienen una alta proporción de minerales arcillosos, que debido a la evolución prácticamente sin interrupciones acción bioquímica, se han dado procesos de transformación de los minerales primarios a minerales secundarios, tales como los óxidos de hierro y aluminio y arcillas propiamente dichas, por lo que es frecuente encontrar áreas con alto grado de laterización bauxítica (Solano y Acuña 1993).

En la parte alta de la cuenca del río Ceibo, se encuentran las Sabanas de Ujarrás, área con vegetación natural de sabana, cuyo origen es edáfico; en las cuencas medias e inferiores de los ríos Volcán y Sonador, importantes extensiones de tierra que antes estaban cubiertas por bosque secundario, se dedican a la agricultura extensiva para el cultivo de piña de exportación (Herrera-Soto 2013).

Los Oxisoles y los Ultisoles, al igual que sus subórdenes Ustox y Humults son dominantes en el área de estudio (figura 5.6, 5.7 y 5.10), estos suelos desde el punto de vista de las propiedades químicas, son muy deficientes; pero desde el punto de vista de las propiedades físicas, presentan un ordenamiento estructural natural favorable, que facilita la percolación de los excedentes de agua (Pacheco 1990); pero bajo uso agrícola intensivo pierden estas características y los hacen más susceptibles a la erosión hídrica, más aún en áreas que se encuentren bajo una escasa cobertura vegetal (Solano y Acuña 1993).

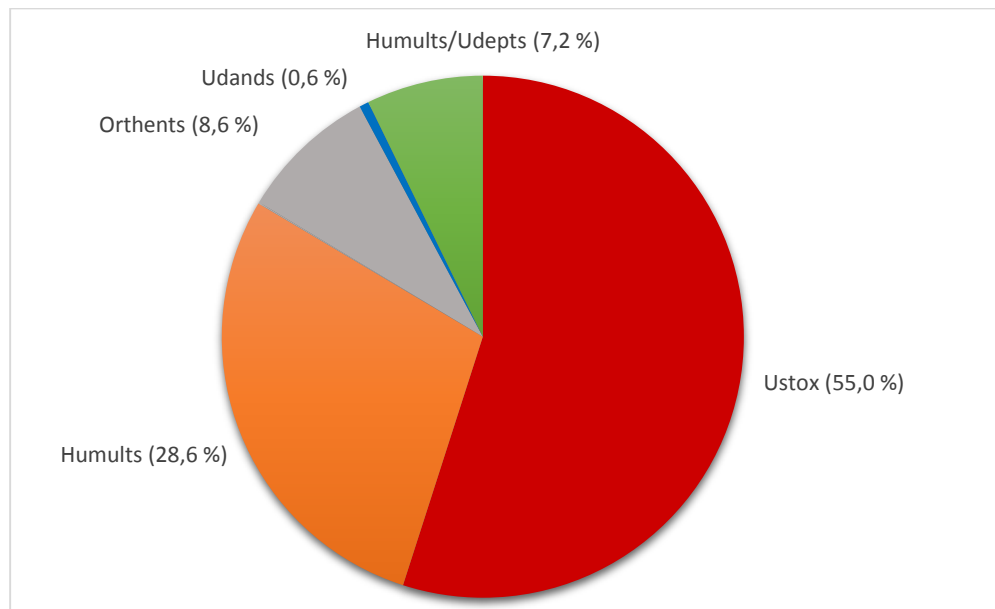


Figura 5.10. Porcentaje de dominancia de los subórdenes: Ustox, Humults, Orthents, Udands y asociación de Humults/Udepts en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas.

Salazar (2015), en su estudio de caracterización de los principales suelos de la Cuenca del río Savegre, reporta la presencia de Ultisoles, Inceptisoles y Entisoles en la Cordillera de Talamanca, encontrando Haplohumults y Palehumults con propiedades ándicas (clasificados como Andic a nivel de subgrupo), con la misma clase de tamaño de partícula, mineralogía y régimen de temperatura del suelo que los perfiles Dúrika (P15) y La Ceiba (P20); mientras que los Entisoles encontrados contrastan con los de esta investigación en el régimen de humedad del suelo, siendo clasificados por Salazar (2015) como Udorthents, pero concordando en clase de mineralogía y régimen de temperatura del suelo con los perfiles Santa María (P8) y Ujarrás (P22).

Por otra parte, Chinchilla (2010) en su estudio sobre la génesis y clasificación de suelos y tierras para uso agrícola en la subcuenca media-alta del río Pirrís, encontró Andisoles derivados de cenizas volcánicas en la Cordillera de Talamanca y menciona que su origen se debe a las condiciones climáticas de la zona y el tiempo relativamente corto desde que estas cenizas se depositaron; además reportó Entisoles en los fondos de valle y en terrazas recientes de ríos, e incluso reporta Entisoles clasificados como Andic Ustifluvents, clasificados como por la presencia de cenizas volcánicas en la superficie, y considera que esta ceniza proviene de procesos erosivos de la Cordillera de Talamanca.

Chinchilla (2010) reportó Andisoles y la presencia de Entisoles derivados de cenizas volcánicas, mientras que Salazar (2015) reportó Ultisoles con propiedades ándicas en la Cordillera de Talamanca. Al igual que van Uffelen (1993) que encontró Andisoles y horizontes superficiales de otros suelos con influencia de cenizas volcánicas tienen una edad aproximada de 600 años (Holoceno Tardío), lo que corrobora la presencia de estos suelos en secciones de la parte alta de la Cordillera de Talamanca y que es importante realizar estudios conocer el área y distribución de este orden de suelos en la cordillera.

A pesar de que el polipedón es una unidad de clasificación pura y un solo concepto, un mapa de suelos es una entidad real, visible e independiente; por lo tanto, las unidades de mapa en su mayoría contienen impurezas de otros suelos, lo que se solventa realizando mapeo a escala más detallada; sin embargo, esto aumenta los costos (Moameni 1999). Es así como los mapas elaborados en esta investigación representan de manera general a los suelos que existen en el área de estudio y se pretende que sirvan de base para futuros estudios de suelos en la zona, para afinar más la escala y detalle de la distribución de los suelos en Buenos Aires de Puntarenas.

La identificación y ubicación de estos suelos es de suma importancia para su manejo agronómico; la falta de información pedológica conlleva a una inadecuada planeación de las actividades agrícolas y ganaderas, y por consiguiente a altos índices de degradación y erosión (Encina e Ibarra 2003). Un mayor conocimiento sobre los suelos de esta área permitirá incorporar acciones de manejo apropiadas según el orden de suelo en que se encuentren los

distintos sistemas productivos, tomando en cuenta sus características físicas, químicas y biológicas, así como su grado de meteorización y susceptibilidad a la degradación, además de establecer acciones para afrontar esta problemática (Sánchez *et al.* 2012).

Conclusiones

- Los Oxisoles son el orden de suelo dominante ocupando un 55 % del área de estudio, seguido por Ultisoles y los Entisoles, Inceptisoles y Andisoles.
- Los contenidos de óxidos de hierro que dan el color a los suelos, así como los contenidos de carbono orgánico son aspectos que influyen en la clasificación taxonómica de los Oxisoles a nivel de subgrupo e influye en la distribución de estos suelos en el área de estudio.
- Los Acrustox tienden a presentarse en las partes medias y bajas de los abanicos aluviales de Buenos Aires de Puntarenas, mientras que los Kandistox tienen una distribución más general en el área de estudio.
- En los abanicos Cordoncillo y Llano Bonito se presentan Oxisoles con rocas superficiales clasificados en el subgrupo Lithic.
- Los Ultisoles se caracterizan por presentar buenos contenidos de materia orgánica (Humults) y se encuentran en la parte media y al este del área estudio.
- Los Entisoles se diferencian a nivel de suborden debido a presencia de contacto lítico o paralítico, característica determinante la profundidad efectiva de estos suelos.
- La ubicación de los Entisoles está asociada principalmente a los márgenes de los ríos y sus terrazas.
- Es importante realizar estudios para conocer la presencia, distribución y área que ocupan los Andisoles en la parte alta de la Cordillera de Talamanca.

Literatura citada

Aberegg, I; Egli, M; Sartori, G; Purves, R. 2009. Modelling spatial distribution of soil types and characteristics in a high Alpine valley (Val di Sole, Trentino, Italy). *Studi Trentini Sci. Nat.* 85. 10.5167/uzh-23750.

Acón, J; Briceño, L; Mata, R; Ugalde, MA. 1989. Estudio para aumentar el nivel de detalle del mapa de suelos de costa Rica a escala 1:200.000. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Secretaria Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA), Consultora Acón y Asociados. Financiado con fondos de preinversión No. FP-1/88G. MIDEPLAN. 909 p.

Bajracharya, R. 2021. *Soil Formation*. 10.1007/978-3-030-80999-7_6.

Bergoeing, JP. 2011. Los conos de deyección del Valle de El General, Costa Rica. *Revista Geográfica* 150. 12 p.

Buol, SW; Hole, FD; McCracken, RJ. 1990. *Génesis y clasificación de suelos*. 2 Ed. Trillas, D. F. México. 417 p.

Carré, F; McBratney, AB; Mayr, T; Montanarella, L. 2007. Digital soil assessments: Beyond DSM. *Geoderma* 142: 69–79 p.

Chinchilla, ME. 2010. *Génesis y clasificación de suelos y tierras para uso agrícola en la subcuenca media-alta del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica*. Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica. 164 p.

Ellis, S. Mellor, T. 1995. *Soils and Environment*. 1 Ed. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203415245>

Elzakker, C. 2004. The use of maps in the exploration of geographic data. *Nederlandse Geografische Studies*.

Encina, A. Ibarra, J. 2003. La degradación del suelo y sus efectos sobre la población. *Revista Población y Desarrollo*. Facultad de Ciencias Económicas-UNA/FNUAP. Ed. No. 25. 4-9 p.

Gómez, O; Méndez, R. 1996. Mapa de grupos y subgrupos de suelos de Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Departamento de Suelos y Evaluación de Tierras. Dirección de Investigaciones Agropecuarias.

Hanchard, M. 2018. Digital maps and anchored time. 10.7765/9781526122520.00016.

Herrera-Soto, W. 2013. Costa Rica a vista de pájaro: una visión aerográfica y bioclimática a través de paisajes naturales y urbanos. Zamora Murillo, C. (Ed.). 1 Ed. Editorial UCR, UNED, CONARE, PRIAS, CENAT. San José, Costa Rica. 290 p.

Ibáñez, S; Gisbert, JM; Moreno, H. 2011. Oxisoles. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal. 6 p.

IGN (Instituto Geográfico Nacional). 1980. Hoja cartográfica Buenos Aires 3543 IV. 3 Ed. San José, Costa Rica. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Ikonovic, V. 2001. Importance of education in cartography. *Proceedings of the 20th International Cartographic Conference*, 6-10 August, Beijing, China.

Janzen, D. 1991. Historia natural de Costa Rica. Traducción Manuel Chavarría A. 1 Ed. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, C.R.

Kesel, RH; Spicer, BE. 1985. Geomorphologic relationships and ages of soils on alluvial fans in the río General Valley. Costa Rica. *Catena*. 12: 149–166 p.

Koyel, P; Vibhash, J. 2021. Paradigm Shifts in Geographical Research and Geospatial Applications. *Sociedade & Natureza*. 33. 10.14393/SN-v33-2021.59651.

Krishnaswamy, J; Richter, DD. 2002. Properties of advanced weathering-stage soils in tropical forests and pastures. *Soil Science Society America Journal* 66: 244-253 p.

Lapaine, M; Midtbø, T; Gartner, G; Bandrova, T; Wang, T; Shen, J. 2021. Definition of the Map. *Advances in Cartography and GIScience of the ICA*. 3. 1-6. 10.5194/ica-adv-3-9-2021.

Lenka, B; Divya, RK. 2020. An Introduction to Digital Soil Mapping. 10.22271/ed.book.773.

Mata-Chinchilla, R; Castro-Chinchilla, J. 2019. Geoportal de suelos de Costa Rica como Bien Público al servicio del país. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32, Especial. XIII CLIA. 51-56 p.

Mata, R; Rosales, A; Sandoval, D. 2016. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica. CIA, UCR, INTA, IICA.

Mata, R; Rosales, A; Sandoval, D. Vindas, E; Alemán, B. 2022. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica 2022. Esc. 1:200.000. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

McBratney, AB; Mendonça-Santos, ML; Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117: 3-52 p.

Moameni, A. 1999. Soil quality changes under long term wheat cultivation in the Marvdasht plain, south-central Iran [Ph.D. dissertation] Ghent University, Ghent, Belgium. 284 p.

Nieto, JA. 2014. El ABC de los suelos para no expertos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia 130 p.

Obando, LG; Kussmaul, S. 2009. Mapa geológico de la hoja Buenos Aires, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. 41: 2 p.

Pacheco, R. 1990. El manejo de suelos de baja fertilidad con énfasis en los Ultisoles del Valle del General. 1 Seminario sobre el Manejo de Suelos Tropicales: Posibilidades y limitaciones ecológicas, GOETHEPRODAF (GTZ) - UNED (PEA). San José, Costa Rica. 16 p.

Quesada-Román, A. 2016. Peligros geomorfológicos: Inundaciones y procesos de ladera en la Cuenca Alta del río General, Pérez Zeledón, Costa Rica. Tesis para optar por el grado de: Maestro en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México D. F. 157 p.

Salazar, C. 2015. Caracterización de los principales suelos de la Cuenca del río Savegre, Costa Rica. Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica. 203 p.

Sánchez, R; Gómez, C; Palacios, A; Otero, J; Cocomá, N; Bejarano, MC. 2012. Programa nacional de monitoreo y seguimiento de la degradación de suelos y tierras en Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia. 13 p.

Sarmadian, F; Mousavi, SR; Keshavarzi, A; Sadeghnejad, M. 2014. Investigation the variation of soil mapping units using geopedological approach. *Acta Advances in Agricultural Sciences*. 2. 1–9 p.

Schaetzl, R; Anderson, S. 2005. *Gensis and geomorphology*, Cambridge University Press, New York, 817 p.

Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE. Natl. Soil Surv. Ctr., Lincoln, NE (September).

Scull, P; Franklin, J; Chadwick, OA; McArthur, D. 2003. Predictive soil mapping: a review. *Prog. Phys. Geog.*, 27: 171–97 p.

Soil Survey Staff. 2022. Keys to Soil Taxonomy, 13 edition. USDA Natural Resources Conservation Service.

Solano, F; Acuña, R. 1993. Estudio de erosión hídrica y evaluación de prácticas de conservación de suelos bajo cultivo de piña (*Ananas comosus*) Buenos Aires, Puntarenas. Departamento de Geografía. Universidad de Costa Rica. 140 p.

Thompson, J; Roecker, S; Grunwald, S; Owens, PR. 2012. Digital Soil Mapping. 10.1016/B978-0-12-386941-8.00021-6.

USDA (United States Department of Agriculture). 2017. Soil Survey Manual by Soil Science Division Staff. Washington, D. C.

van Uffelen, JG. 1993. A geological, geomorphological and soil transect study of the Chirripo massif and adjacent areas, Cordillera de Talamanca, CR. Master's Thesis. Wageningen University, Wageningen, NL. 72 p.

Vásquez, A. 1990. Estudio detallado de suelos y clasificación de tierras para riego: evaluación de los recursos de tierras y aguas con fines de riego. Tomo 1. Central Azucarera Tempisque S.A., Liberia, Guanacaste. 142 p.

Zhao, Y; Peth, S; Krümmelbein, J; Horn, R; Wang, Z; Steffens, M; Hoffmann, C; Peng, X. 2007. Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland. *Ecol Model.* 205(1-2): 241–254 p.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN GENERAL, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Discusión general

El objetivo general de esta tesis fue caracterizar morfológica, física, química, mineralógicamente y clasificar a nivel de familia mineralógica, los suelos altamente meteorizados derivados de abanicos aluviales antiguos en la zona de Buenos Aires de Puntarenas, Costa Rica. Para cumplir este objetivo se plantearon tres objetivos específicos: determinar las principales características físicas, químicas y mineralógicas de los suelos derivados de abanicos aluviales de Buenos Aires de Puntarenas; clasificarlos taxonómicamente, según estas características y realizar un levantamiento de los suelos identificados a una escala 1:200.000.

Según las características morfológicas, físicas y químicas de los perfiles modales analizados, los suelos del área de estudio se pueden agrupar en tres órdenes; Oxisoles y Ultisoles como los más abundantes, que se encuentra tanto en partes altas como en las partes bajas de la zona y Entisoles, cuya distribución está asociada a los márgenes de los ríos.

Los Oxisoles y Ultisoles por lo general son suelos profundos y altamente meteorizados, dominados por minerales arcillosos de baja actividad (1:1) y óxidos, oxi-hidróxidos e hidróxidos de hierro y aluminio en proporciones variables, según el material parental y la intensidad de la meteorización que hayan sufrido (Schaefer *et al.* 2008). Los Entisoles se distinguen por ser suelos superficiales que se forman en pendientes pronunciadas o zonas de deposición de materiales (Bazuki y Sheil 2005).

Desde el punto de vista físico los Oxisoles tienen una estructura estable; sin embargo, pueden sufrir una densificación por uso agropecuario, por lo que son susceptibles de degradarse una vez que se altere la condición natural (Camacho-Tamayo *et al.* 2010); los valores de densidad aparente de los perfiles estudiados mostraron valores dentro de los rangos típicos para Oxisoles como los reportados por (Molina *et al.* 2003) y son indicativos de procesos naturales de densificación (Phiri *et al.* 2001); presentaron texturas que varían de franco arenosa a

arcillosa (Beinroth *et al.* 1996) y los bajos contenidos de arena y limo indican un grado avanzado de meteorización de estos suelos, característica típica de los Oxisoles (EMBRAPA 2006). Desde el punto de vista químico, el pH de los Oxisoles es ácido desde la superficie hasta el subsuelo debido a aluminio intercambiable presente en estos suelos tropicales (Kome *et al.* 2016, Pragma *et al.* 2016) y que es liberado al complejo de intercambio del suelo por los procesos de meteorización (Mansyur 2019). Los Oxisoles mostraron comparativamente altos contenidos de carbono orgánico, aspecto fundamental que contribuye a incrementar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Camacho-Tamayo *et al.* 2010). Los perfiles estudiados clasificados como Oxisoles presentaron un horizonte kándico dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral y son de régimen de humedad ústico (Ibáñez *et al.* 2011a) y se clasificaron como Acrustox y Kandustox, la diferenciación a nivel de subgrupo entre estos suelos se da por aspectos de coloración y el stock de carbono en los primeros 100 cm del perfil. El color del suelo es un indicador confiable de la mineralogía que refleja su génesis (Curi y Franzmeier 1984) y pueden almacenar aproximadamente un 7,5 % del carbono de los suelos (Eswaran *et al.* 1993).

Los Ultisoles igualmente muestran una tendencia a densificarse, aunque en menor medida que los Oxisoles; presentaron una clase textural arcillosa, lo que concuerda con Ultisoles descritos por Prasetyo y Suharta (2004), donde los contenidos de arcilla tienden a incrementarse con el incremento de la profundidad, evidencia del proceso de iluviación de arcilla que propicia la formación de endopedones argílicos (Aditya *et al.* 2021). Los Ultisoles mostraron pH ácidos, pero menos ácidos que los Oxisoles, con valores en el rango de los Ultisoles estudiados por Jaimes *et al.* (2003) y Rubiano (2005); también presentaron altos contenidos de carbono orgánico (dentro del orden), como para clasificarse como Humults a nivel de suborden, que son Ultisoles con buenos contenidos en materia orgánica (Chávez y Chavarría 2017) y como Palehumults, donde el prefijo Pale denota que son suelos pedogenéticamente desarrollados con altos contenidos de arcilla estabilizada.

Los Entisoles generalmente son suelos poco profundos y de clase textural de arenosa a franca (Benites *et al.* 2007), se asocian a depósitos aluviales o materiales producto de la meteorización del material parental (Ratke *et al.* 2020). El pH de estos suelos puede llegar a

ser ácido por los contenidos de aluminio presente en el material parental (Chinchilla *et al.* 2011; Singh *et al.* 2017; Santos *et al.* 2018) y generalmente, presentan cantidades de carbono orgánico altas como las de los perfiles estudiados por Poppiel *et al.* (2018). Los Entisoles descritos son poco desarrollados, con piedra en diferentes proporciones y de régimen de humedad ústico por lo tanto se clasifican como Ustorhents (Ibáñez *et al.* 2011b).

Para clasificación taxonómica a nivel de familia mineralógica, se parte de la definición del tamaño de partícula. El tamaño de partícula se utiliza para determinar las proporciones de los minerales inorgánicos de la fracción arcillosa y permite comprender la química del suelo y su funcionamiento físico (Leão 2016).

A nivel de mineralogía de arcillas, se llegaron a identificar cuatro clases, la primera fue gibbsítica, la segunda clase fue sésquica, la tercera clase es alítica y la cuarta clase fue mezclada; clases de mineralogía reportadas en estudios taxonómicos y mineralógicos Entisoles y Ultisoles cercanos al río Terraba por Gómez y Chinchilla (2005), quienes encontraron importantes contenidos de gibbsita, hematita, caolinita y cuarzo como minerales dominantes, y son considerados como minerales resistentes (Soil Survey Staff 2004). La gibbsita es un óxido de aluminio común y abundante en suelos de regiones tropicales y subtropicales (Fontes y Weed 1991; Ker 1997), debido a las altas tasas de lixiviación (Macías-Vázquez 1981; Caner *et al.* 2014); y cuando este mineral es dominante en el suelo la clase mineralógica es gibbsítica. La clase sésquica se presenta cuando no hay dominancia de la gibbsita en la fracción mineral, sino que también hay presencia de óxidos de hierro como goethita y la hematita (Soil Survey Staff 2004). Los suelos alíticos se caracterizan por una meteorización casi completa de los minerales primarios, son suelos típicos del trópico húmedo ricos en aluminio, pero en menor medida que los suelos gibbsíticos, algunos pueden ser ricos en halloysita (Latham 1982; Soca y Daza-Torres 2016). La clase de mineralogía mezclada resulta de la presencia de arcillas 2:1, arcilla de capas mixtas y otros minerales como feldespatos, cuarzo, ortoclasa, que contribuyen a mejorar significativamente la CIC (Sultan 2006).

En suelos altamente meteorizados como Oxisoles y Ultisoles, los tamaños de partícula suelen ser de fino a muy fino, ya que la fracción arcillosa tiende a aumentar debido a los procesos de meteorización Muggler *et al.* (1997); mientras que suelos menos meteorizados como los Entisoles, presentan tamaños de partícula gruesos, como franco-fino, franco-grueso incluso más gruesos como franco-arenoso y arenoso (Martín-García *et al.* 2015).

El régimen de temperatura del suelo en la zona de estudio es isohipertérmico, según el registro de la estación Planta Volcán. Este régimen de temperatura ya ha sido reportado en San Ignacio de Acosta, en la zona Atlántica, Liberia, Turrialba, río Colorado, Guápiles, Guácimo, Limón, Montelimar, Turrialba, en la Península de Santa Elena, por nombrar algunos (Alvarado *et al.* 1982; Lansu 1988; CATIE-ISRIC 1994; Forsythe 2002; Alexander 2018). Con la clase de tamaño de partícula, la clase de mineralogía de las arcillas y el régimen de temperatura del suelo, agregados a la clasificación a nivel de subgrupo, se logró establecer la clasificación a nivel de familia mineralógica para los pedones de suelos representativos del área de estudio.

El área de estudio constó de 531,4 km², que fueron mapeados a una escala de 1:200.000 hasta el nivel de subgrupo y 286,6 km² del área total fueron mapeados a nivel de familia mineralógica a la misma escala. En general se destaca la acción integrada de procesos morfogénéticos como vulcanismo y tectonismo, que originaron una geomorfología de abanicos aluviales antiguos, característica de la zona, la cual ha influido en la génesis y distribución de los suelos de Buenos Aires de Puntarenas (Solano y Acuña 1993).

En los mapas de los suelos derivados de abanicos aluviales antiguos altamente meteorizados en Buenos Aires de Puntarenas, se puede observar que los Oxisoles y Ultisoles se encuentran en superficies más antiguas y estables del área de estudio, desde las partes altas, en las llanuras y piedemonte (Bajracharya 2021), y suelos más recientes como los Entisoles, se ubican en los ápices de los abanicos aluviales de los ríos y a lo largo de sus riberas, se extienden en las partes medias y valles y en depósitos aluvionales recientes (Krishnaswamy y Richter 2002).

Conclusiones

- Los Oxisoles (55,0 %) y Ultisoles (28,6 %) son los suelos dominantes en los abanicos aluviales antiguos de la zona de Buenos Aires de Puntarenas.
- Los Oxisoles y Ultisoles se caracterizaron por presentar bajos contenidos de bases intercambiables, baja saturación de bases, pH ácidos y altos valores de saturación de acidez.
- La escasa fertilidad química de los Oxisoles y Ultisoles del área de estudio, es compensada en cierta medida por los buenos contenidos de carbono orgánico, por lo que es de suma importancia conservar la materia orgánica de estos suelos.
- Estos suelos presentaron altos contenidos de arcilla, como se vieron reflejados en los análisis de laboratorio y en las clases de tamaño de partícula muy fina y fina, lo que presenta limitaciones para labores de mecanización, ya que son suelos duros al estar secos y muy adhesivos y muy plásticos al estar húmedos.
- Según el registro de datos climáticos, se puede considerar que el área de estudio presenta un régimen de humedad ústico, lo que indica que el suelo está seco por más de 3 meses.
- Los altos contenidos de óxidos de hierro y los contenidos moderados de carbono orgánico, son aspectos importantes que influyen en la clasificación taxonómica de los Oxisoles, lo que se evidencia en la coloración (Rhodic) y en un buen stock de carbono (Humic).
- La gibbsita es el principal mineral presente en la fracción arcillosa de los suelos altamente meteorizados de Buenos Aires de Puntarenas, seguido por goethita y hematita, todos ellos considerados como minerales no meteorizables o resistentes a la meteorización.
- Los minerales encontrados en la fracción arcillosa les confieren a estos suelos una baja capacidad de intercambio catiónico, lo que se manifiesta en una baja fertilidad química.
- Los Oxisoles y Ultisoles se ubican en las superficies más antiguas y estables del área de estudio, mientras que los Entisoles se ubican principalmente en las márgenes de los ríos y sus terrazas aluviales.

Recomendaciones

- Dado que estos suelos presentan altos contenidos de arcilla, baja conductividad hidráulica, poca agua disponible, baja CIC, alta acidez y alta saturación de acidez, con problemas de erosión severa, moderada y muy severa, se recomienda manejarlos cuidadosamente, debido a que son suelos frágiles y susceptibles a la degradación.
- Suelos con altos contenidos de arcilla no silicatada, como Oxisoles y Ultisoles, presentan problemas de dispersión ya que se forman pseudoarenas o microagregados arcillosos, y generalmente se reportan valores de arcilla menores a los que poseen en realidad, por lo que se recomienda mejorar los procedimientos de dispersión en los laboratorios de análisis físicos de suelos.
- En caso de suelos altamente meteorizados, ya sean Oxisoles o Ultisoles, se debe realizar una determinación de CIC adecuada, para no sobreestimar su valor (utilizar el reactivo de Nessler y para realizar los lavados necesarios a la muestra), y no hacer una clasificación incorrecta del orden de suelo.
- En esta investigación no se logró establecer la presencia de un horizonte óxico, por lo que es importante buscar las herramientas necesarias para poder determinarlo adecuadamente en caso de estar presente.
- Es importante realizar estudios de suelos para confirmar la presencia, conocer la distribución y el área que ocupan los Andisoles en la parte alta de la Cordillera de Talamanca.
- Los mapas elaborados en esta investigación representan de manera general a los suelos que existentes en el área de estudio y se pretende que sirvan de base para futuros estudios de suelos en la zona, y a su vez para concientizar a la población sobre el uso y manejo que se les da, con el fin de conservarlos y reducir su degradación.
- Áreas importantes de Ultisoles identificados en Costa Rica podrían ser clasificadas como de Oxisoles, por lo que se deben realizar más investigaciones como esta, para conocer la extensión real de este orden de suelo en el país.

Literatura general citada

Aberegg, I; Egli, M; Sartori, G; Purves, R. 2009. Modelling spatial distribution of soil types and characteristics in a high Alpine valley (Val di Sole, Trentino, Italy). *Studi Trentini Sci. Nat.* 85. 10.5167/uzh-23750.

Abratis, M. 1998. Geochemical variations in magmatic rocks from southern Costa Rica as a consequence of Cocos Ridge subduction and uplift of the Cordillera de Talamanca. Universidad de Göttingen, Alemania [Tesis Ph. D]. 134 p.

Abratis, M; Wörmer, G. 2001: Ridge collision slab-window formation, and the flux of Pacific asthenosphere into the Caribbean realm. *Geology* 29, 127-130 p.

Acón, J; Briceño, L; Mata, R; Ugalde, MA. 1989. Estudio para aumentar el nivel de detalle del mapa de suelos de costa Rica a escala 1:200.000. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Secretaria Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA), Consultora Acón y Asociados. Financiado con fondos de preinversión No. FP-1/88G. MIDEPLAN. 909 p.

Aditya, HF; Seca, G; Rayes, ML; Karam, DS. 2021. Toposequent Effect on Soil Morphology and Classification of Ultisol Soil in the Ayer Hitam Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *Jurnal Sylva Lestari*. Vol. 9 (2): 202-212 p.

Al-Ani, T; Sarapää, O. 2008. Clay and clay mineralogy. Physical-Chemical properties and industrial uses. Geological Survey of Finland. 96 p.

Alexander, EB. 2018. Serpentine Landscapes of Costa Rica the Santa Elena Peninsula. *Soils and Geoecology*. 36 p

Alonso, S; Solano, J. 2017. Investigación y análisis bibliográfico sobre la dinámica de uso de suelo: procesos en juego e impacto en Costa Rica. CINPE. Cuadernos de política económica. Heredia, Costa Rica. 52 p.

Alvarado, A; Glover, N; Obando, O. 1982. Reconocimiento de los suelos de Puriscal, Salitrales y Tabarcia - San Ignacio de Acosta, Costa Rica, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Alvarado, GE; Kussmaul, S; Chiesa, S; Gillot, PY; Appel, H; Wörmer, G; Rundle, C. 1992. Resumen cronoestratigráfico de las rocas ígneas de Costa Rica, basado en dataciones radiométricas. *J. South Amer. Earth Sci.* 6 (3): 151–168 p.

Alvarado, A; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense.* 29 (1): 85-94 p.

Alvarado, A; Mata, R; Chinchilla, M. 2014. Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931–2014: II. Mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxídico caolínicas. *Agronomía Costarricense.* 38 (1): 107-131 p.

Alvarado-Hernández, A. 2022. Suelos de Centroamérica. 1 Ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. Editorial Universidad Nacional. Editorial Universidad Estatal a Distancia. Editorial Técnica Nacional. Cartago, Costa Rica. 362 p.

Amador, M; Sánchez, J; Arguedas, M; Araya, R; Guevara, F; Maroto, D; Sánchez, J; Vargas, F. 2011. Informe final de investigación. Estudio regional sobre el desarrollo local de los cantones (trans) fronterizos del Pacífico Sur de Costa Rica. Instituto de formación y capacitación municipal y de desarrollo local. Universidad Estatal a Distancia (UNED). San José, Costa Rica. 432 p.

Anderson, MS; Byers, HG. 1931. Character of the colloidal materials in the profiles of major soil groups of the United States. *U.S. Dept. Agr. Tech. Bull.* 228 p.

Araujo Filho, RN; Holanda, F; Moacyr, F; Piscoya, V; Neto, J; Guimarães, D. 2021. Relationship between physical and chemical properties of Entisols-Fluvents and erosion in the São Francisco River. *Revista Caatinga.* 34. 422-431 p.

Araujo-Junior, CF; Tácito Gontijo Guimarães, P; de Souza Dias Junior, M; Nunes Alcântara, E; Resende Mendes, AD. 2011. Alterações nos atributos químicos de um latossolo pelo manejo de plantas invasoras em cafeeiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35(6): 2207-2217 p.

Arauz, II. 2010. Análisis del Sistema Turístico del Cantón de Buenos Aires: Insumo para un Diseño de Plan de Desarrollo en Turismo Rural. EUMED. Universidad de Málaga. Málaga, España. 126 p.

Artavia, LG. 2011. *Revista Geográfica de América Central Número Especial EGAL 2011-Costa Rica II*. 1–15 p.

Aukland, 1959. Clay mineralogy techniques. A review. Department of Natural Resources. Ohio, USA. 36 p.

Áviles, MA; Erbez, JA; Sánchez, PJ; Pérez, JL. 1993. Aplicación de las vermiculitas de Andalucía a la síntesis de cerámicas avanzadas. *Boletín Sociedad Española de Ceramistas*. Vol. 32. 2. 101-112 p.

Bajracharya, R. 2021. *Soil Formation*. 10.1007/978-3-030-80999-7_6.

Balasubramanian, A. 2017. *Soil Taxonomy & Classification*. Centre for Advanced Studies in Earth Science, University of Mysore, Mysore. 7 p. 10.13140/RG.2.2.15832.08964.

Barrios, E; Bekunda, M; Delve, RJ; Esilaba, A; Mowo, J. 2001. Identifying and classifying local indicators of soil quality. Eastern Africa Version. *Participatory Methods for Decision Making in Natural Resource Management*. CIAT-SWNM-TSBF-AHI.

Bazuki, I; Sheil, D. 2005. Local perspectives of forest landscapes: A preliminary evaluation of land and soils, and their importance in Malinau, East Kalimantan, Indonesia. Center for International Forestry Research (CIFOR).

Beinroth, FH; Eswaran, H; Palmieri, F; Reich, PF. 1996. Properties, Classification, and Management of Oxisols. Soil Management Collaborative Research Support Program. Washington, D. C, USA. 174 p.

Benites, V; Schaefer, C; Simas, F; Santos, H. 2007. Soils associated with rock outcrops in the Brazilian mountain ranges Mantiqueira and Espinhaço. Brazilian Journal of Botany.

Bergaya, F; Lagaly, G. 2006. General introduction: clays, clay minerals, and clay science. Developments in clay science. Vol 1. 1-18 p.

Bergoeing, JP. 2008. Interpretación geomorfológica del volcán Barú, Panamá. Revista Geográfica. No. 14. 117-124 p.

Bergoeing, JP. 2011. Los conos de deyección del Valle de El General, Costa Rica. Revista Geográfica 150. 12 p.

Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. San José, CR, IICA. 1216 p.

Betrano, S. 2017. Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Evolución sobre la legislación sobre uso del suelo en Costa Rica (1949-2016). 472 p.

Bhattacharyya, T; Pal, DK. 2015. Soil. Science an introduction. 1 Ed. New Delhi. 39-56 p.

Bigham, JM; Golden, DC; Bowen, LH; Buol, SW; Weed, SB. 1978. Iron Oxide Mineralogy of Well-drained Ultisols and Oxisols: I. Characterization of Iron Oxides in Soil Clays by Mössbauer Spectroscopy, X-ray Diffractometry, and Selected Chemical Techniques. Soil Science Society of America Journal, 42: 816-825 p.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200050033x>

Bilibio, WD; Corrêa, GF; Borges, EN. 2010. Atributos físicos e químicos de um Latossolo, sob diferentes sistemas de cultivo. Cienc Agrotec. 34: 817-22 p.

Birkeland, PW. 1974. *Pedology, weathering and geomorphological research*. Oxford University Press. London. New York. 1974.

Blanco, I. 2010. Estudio de la dispersión y exfoliación de nanopartículas inorgánicas y modificación de polietileno con ácido itacónico aplicando ultrasonido durante la extrusión reactiva. Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Tecnología de Polímeros. Saltillo, Coahuila. Mexico. 105 p.

Bockheim, J; Gennadiyev, A; Hammer, R; Tandarich, J. 2005. Historical development of key concepts in pedology. *Geoderma*. 124. 23-36. 10.1016/j.geoderma.2004.03.004.

Bowen, NL. 1928. *The Evolution of the Igneous Rocks*: Princeton, New Jersey, Princeton University Press. 332 p.

Braun, HMM; Kruijne R. 1994. Soil Conditions. In: Ritzema, HP (Ed.). *Drainage Principles and Applications*. ILRI Publication 16. 77-110 p.

Brevik, E; Cerdà, A; Mataix-Solera, J; Pereg, L; Quinton, J; Six, J; Oost, K. 2015. The interdisciplinary nature of Soil. *SOIL*. 1. 117–129 p.

Brunelle, S. 2020. Appendix P: Guidance for Soil Collection, Characterization, and Application for Biothreat Agent Detection Method and Site Evaluations, *Journal of AOAC International*. Volume 103. Issue 4. July–August 2020. 873–881 p.

Buol, SW; Couto, W; Greenland, DJ. 1981. Soil fertility capability assessment for use in the humid tropics. *Characterization of Soils in Relation to their Management for Crop Production*. Clarendon Press, London. 254–261 p.

Buol, SW; Hole, FD; McCracken, RJ. 1990. *Génesis y clasificación de suelos*. 2 Ed. Trillas, D. F. México. 417 p.

Buol, SW; Eswaran, H. 1999. Oxisols. *Adv. Agron.* 68, 151-195 p.

Buol, SW; Southard, RJ; Graham, RC; McDaniel, PA. 2003. *Soil genesis and classification*. 5 Ed. Blackwell Publishing. Iowa, USA. 494 p.

Burt, R. 2004. *Soil survey laboratory methods manual*. USDA, Natural Resources Conservation Service. Soil survey investigations report No. 42. Ver 4. US. 700 p.

Bustillo, MA. 1989. Las rocas silíceas como materia prima en la industria actual. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 100-6. 170-179 p.

Camacho, ME; Mata, R; Barrantes-Viquez, M; Alvarado, A. 2021. Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. *CATENA*, 197, 104992.

Camacho-Tamayo, JH; Luengas, CA; Leiva, FR. 2010. Evaluación de propiedades físicas de los oxisoles en la altillanura colombiana mediante análisis multivariado. *Suelos Ecuatoriales*. 40. (2): 170-175 p.

Caner, L; Radtke, LM; Vignol-Lelarge, ML; Inda, AV; Bortoluzzi, EC; Mexias, AS. 2014. Basalt and rhyo-dacite weathering and soil clay formation under subtropical climate in southern Brazil. *Geoderma*. 235, 100–112 p.

Cardoso, EJBN; Vasconcellos, RLF; Bini, D; Miyauchi, MYH; dos Santos, CA; Alves, PRL; de Paula, AM; Nakatani, AS; Pereira, JM; Nogueira, MA. 2013. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Scientia Agricola*, 70. 274–289 p.

Carducci, CE; de Olivera, GC; da Costa Siberiano, E; Marques Zeviani, W. 2011. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a Equação Duplo Van Genuchten. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 1. 77-86 p.

Carlson, DH; Plummer, CC; Hammersley, L. 2008. Physical geology, earth revealed. McGraw-Hill. New York. 1200 p.

Carter, MR. 1993. Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis publishers, US. 823 p.

Carré, F; McBratney, AB; Mayr, T; Montanarella, L. 2007. Digital soil assessments: Beyond DSM. *Geoderma* 142: 69–79 p.

Castillo, R. 1978: Geología regional preliminar de una parte del Valle de El General, Costa Rica. Departamento de Desarrollo Geológico y Recursos Minerales, CODESA, Bol. Geol., 1: 289-293 p.

CATIE-ISRIC. 1994. Soil Reference Profiles of Costa Rica. Field and Analytical Data. Country Report 12.

Cedeño, B; Hernández-Ulate, A; López, A; Villalobos, E. 2010. Caracterización socioeconómica de la Cuenca del río Grande de Térraba. Escuela de Relaciones Internacionales. Universidad Nacional (UNA). Heredia, Costa Rica. 36 p.

Chávez, MA; Chavarría, E. 2017. Tipos de suelo y producción de caña de azúcar en Costa Rica: Primera aproximación taxonómica. Congreso Nacional de Suelos, 9, San José, Costa Rica, 2017. Memorias. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). San José, Costa Rica. 6 p.

Chesworth, W; Finkl, C; Doran, JW; Mielke, LN; Mielke, MB; Groenevelt, CW. 2008. Tropical soils. In: Chesworth, W. (Eds.). *Encyclopedia of Soil Science*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_607

Chinchilla, ME. 2010. Génesis y clasificación de suelos y tierras para uso agrícola en la subcuenca media-alta del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica. Tesis sometida a la consideración

de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica. 164 p.

Chinchilla, M; Alvarado, A; Mata, R. 2011. Factores formadores y distribución de suelos de la subcuenca del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 35 (1): 33-57. ISSN: 0377-9424.

Churchman, GJ. 2010. The philosophical status of soil science *Geoderma*. 157. 214-221 p. 10.1016/J.GEODERMA.2010.04.018

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1983. Oxisoles y Ultisoles en America Tropical. I. Distribución, importancia y propiedades físicas. Cali, Colombia. 56 p.

Coleman, M. 2016. Lo que las rocas sedimentarias nos enseñan sobre la Tierra. 1 Ed. The Rosen Publishing Group. New York. 240 p.

Conti, ME. 2007. Principios de edafología con énfasis en suelos argentinos. 2 Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 430 p.

Contreras, M; Díaz, R. 2017. Posibilidades locales de desarrollo en presencia de enclaves: Caso de la Asociación de Productores de Piña de la comunidad de Utrapez, ubicada en la Zona Sur de Costa Rica. *Perspectivas Rurales* (29), 43-72 p.

Cortés, G. 1994. Atlas Agropecuario de Costa Rica. EUNED (Editorial Universidad Estatal a Distancia). San José, Costa Rica. 479-490 p.

Curi, N; Franzmeier, DP. 1984, Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 341-346 p. doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020024x

da Silva, CP; Gomes de Almeida, B; Gomes de Almeida, R; de Alencar, TL; Rocha Lobato, MG; de Sousa Oliveira, L; da Silva Souza, L; da Silva Souza, MC; Anunciato Mota, JC. 2020. Cohesive character in Alfisols, Ultisol and Oxisols in northeast of Brazil: Relationship with tensile strength and particle size. Volume 23. doi.org/10.1016/j.geodrs. 2020. E00341.

Das, B. 2015. Principles of foundation engineering. Cengage learning.

Day, PR. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. *In* Black, CA. (Ed.). Methods of soil analysis vol. 1. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. 545–567 p.

De Boer, JZ; Drummond, MS; Bordelon, MJ; Defant, MJ; Bellon, H. Maury, RC. 1995. Cenozoic magmatic phases of the Costa Rican island arc (Cordillera de Talamanca). *En*: Mann, P (Ed.). Geologic and Tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 295: 35-55 p.

Deer, WA; Howie, RA; Zussman, T. 1975. Rock-forming minerals. Vol. 3. Longmans, Green and Co. Ltd., London.

Delgado, O; Carpio, C; Padilla, F; Ureña, F. 2011. Prospección Región del Diquís, Cantón de Buenos Aires. MIVAH – DVAH. 61 p.

Denef, K; Six, J; Merckx, R; Paustian, K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant and Soil*. 246 (2), 185–200. <http://www.jstor.org/stable/24129127>

Díaz-Romeu, R; Balerdi, F. 1967. Determinación de la Capacidad de Intercambio de Cationes del Suelo. IICA. Turrialba. Costa Rica. Modificado del método de Bower CA, *et al.*, 1952. Exchangeable cations analysis of saline and alkaline soils. *Soil Science*. 73: 251-261 p.

Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 61 p.

Driese, SG; Orvis, KH; Horn, SP; Li, Z; Jenninngs, DS. 2007. Paleosol evidence for Quaternary uplift and the climate and ecosystem changes in the Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 248: 1–23 p.

Drummond, MS; Bordelon, M; De Boer, J; Defant, MJ; Bellon, H; Feigenson, MD. 1995. Igneous petrogenesis and tectonic settings of plutonic and volcanic rocks of the Cordillera de Talamanca, Costa Rica-Panama, Central American Arc. *American Journal of Science* 295 (7): 875-919 p.

Duchaufour, P. 1982. Sesquioxide-rich soils. In: *Pedology*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-6003-2_13

Egbuchua, CN. 2014. Hydraulic Conductivity Functions in Relation to Some Chemical Properties in a Cultivated Oxisols of a Humid Region, Delta State, Nigeria, *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 04, issue 04, number 198410, <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ags:ajosrd:198410>

Elementar Analysensysteme GmbH. 2009. CHNOS Elemental Analyzer vario macro cube. Operating Instructions. Hanau, Alemania. 667 p.

Elizalde, G. 2002. Alteración de Minerales. Universidad Central de Venezuela. Postgrado en Ciencia del Suelo. 36 p.

Ellis, S. Mellor, T. 1995. *Soils and Environment*. 1 Ed. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203415245>

Elzakker, C. 2004. The use of maps in the exploration of geographic data. *Nederlandse Geografische Studies*.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 2006. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. (2 Ed). Rio de Janeiro. 306 p.

Encina, A. Ibarra, J. 2003. La degradación del suelo y sus efectos sobre la población. Revista Población y Desarrollo. Facultad de Ciencias Económicas-UNA/FNUAP. Ed. No. 25. 4-9 p.

Esayas, A; Debele, B. 2006. Soil survey in Ethiopia: past, present and future. In Proceedings of the 8th Conference, Soils for Sustainable Development. 1–10 p. Ethiopian Society of Soil Science, Addis Ababa, Ethiopia, April 2006.

Espejo, R; Gómez, V; Teshome, T; Peregrina, F; Pérez, C. 2002. Incidencia del incremento de temperatura del suelo durante la quema de matorral sobre la textura de la capa más superficial del suelo en las "machambas" de Cabo Delgado (Mozambique). Edafología, ISSN 1135-6863, Vol. 9, N°. 2, 2002. 153-160 p.

Espitia, CJ; Quintero, J; Rodríguez, A; Bernal, FI; Romero, F; Mojica, J; Cabezas, H; Hernández, M; Pachón, M; Múnera, MH; Ramírez, J. 2003. Catálogo de propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las arcillas para cerámica roja en los centros urbanos de Medellín, Ibagué y Sabana de Bogotá. Ministerio de Minas y Energía. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Bogotá, Colombia. 203 p.

Esu, IE. 1991. Detailed Soil Survey of NIHORT Farm at Bunkure, Kano State, Nigeria. Institute for Agricultural Research, Ahmadu Bello University, Zaria.

Eswaran, H. 1977. Soil Analysis for Soil Surveys. In: Soil Resource Inventories. A proceedings of a workshop held at Cornell University, Ithaca, USA. 315-324 p.

Eswaran, H; Berg, E; van D; Reich, P. 1993. Organic carbon in soils of the world. Soil Sci. Soc. Am. J. V. 57, n. 1. 192-194 p.

FAO. 2015. Understanding Mountain Soils: A contribution from mountain areas to the International Year of Soils 2015, by Romeo, R; Vita, A; Manuelli, S; Zanini, E; Freppaz, M; Stanchi, S. Rome, Italy. 169 p.

Fasina, AS; Omolayo, FA; Ajayi, SO; Falodun, AA. 2007. Influence of Land Use on Soil Properties in Three Mapping Units in Southwestern Nigeria-Implications for Sustainable Soil Management. In Uyovbisere, EO; Raji, BA; Yusuf, AA; Ogunwale, JO; Aliyu, L; Ojeniyi, SO. (Eds.). Soil and water management for poverty alleviation and sustainable Environment Proceedings of the 31st annual conf. of SSSN/ABU Zaria Nig. Nov. 13th to 17th, 2006.

Fatai, A; Shamshuddin, J; Fauziah, C; Othman, R; Bohluli, M. 2017. Formation and characteristics of an Ultisol in Peninsular Malaysia utilized for oil palm production. Solid Earth Discussions. 10.5194/se-2017-60 p.

Ferreira, CA; Silva, AC; Torrado, PV; Rocha WW. 2010. Genesis and classification of Oxisols in a highland toposequence of the upper Jequitinhonha Valley (MG). Revista Brasileira de Ciência do Solo. 34: 195-209 p.

Figueroa, ML; Martínez, MR; Ortiz, CA; Fernández, D. 2018. Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. Terra Latinoamericana, 36 (3), 287-299. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.259>.

Firoozi, AA; Firoozi, AA; Baghini, MS; 2016. A review of clayey soils. Asian Journal of Applied Sciences. Volume 04. Issue 06. 1319-1330 p.

Foley, NK. 1999. Environmental characteristics of clays and clay mineral deposits. U.S. Geological Survey. National Center Reston, VA. 3 p.

Fontes, MPF; Weed, SB. 1991. Iron oxides in selected Brazilian oxisols: I. Mineralogy. Soil. Sci. Soc. Am. J. 55, 1143–1149 p.

Forsythe, W. 1985. Física de suelos. Manual de laboratorio. IICA, Costa Rica. 212 p.

Forsythe, W. 2002. Parámetros ambientales que afectan la temperatura del suelo en Turrialba, Costa Rica y sus consecuencias para la producción de cultivos. *Agronomía Costarricense*. 26 (1): 43-62 p.

Freitas, IC; Santos, FCV; Custódio Filho, RO; Correchel, V; Silva, RB. 2013. Agroecossistemas de produção familiar da Amazônia e seus impactos nos atributos do solo. *Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.*17: 1310-1317 p.

Freitas, PL; de Blancaneaux PH; Moreau, M. 1996. Caractérisation des sols des Cerrados Brésiliens (Savanes) dans le cadre de l'analyse morphostructurale. In: Réunion du Groupe Thématique "Structure et Fertilité des Sols Tropicaux". 3. ORSTOM, Montpellier. Compte Rendu. Montpellier: ORSTOM: 6-23 p.

Gabb, WM. 1874: On the Geology of Republic of Costa Rica. Transcripción de Lucke, OH; Gutiérrez, V; Soto, G. 2007 [del original del manuscrito de la biblioteca del U.S. Geological Survey, bajo la signatura 203(386) gG20]. *Rev. Geol. Amér. Central*, 37 Especial: 103-118 p.

Gasparini, AS; Fontes, MPF; Pacheco, AA; Ker, JC. 2022. Gibbsite Crystallinity and Morphology in Ferralsols and Bauxites. *Minerals* 2022. 12, 1441. <https://doi.org/10.3390/min12111441>

Gazel, E; Carr, M; Hoernle, K; Feigenson, MD; Szymanski, D; Hauff, F; Bogaard, P. 2009. Galápagos-OIB signature in southern Central America: Mantle refertilization by arc-hot spot interaction. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 10 (2): 1–32 p.

Ghidin, AA; de Freitas Melo, V; Costa Lima, V; Costa Lima, JMJ. 2006. Oxisol toposequences developed from basaltic rocks in Paraná State, Brazil: II - relationship

between clay fraction mineralogy and physical soil properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Vol. 30, no. 2. 307–319 p.

Gómez, O; Méndez, R. 1996. Mapa de grupos y subgrupos de suelos de Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Departamento de Suelos y Evaluación de Tierras. Dirección de Investigaciones Agropecuarias.

Gómez, VO; Chinchilla, M. 2005. Estudio taxonómico y mineralógico de los suelos de la cuenca del río Térraba a escala 1:50.000, provincias de Puntarenas y San José. MAG/ICE. San José, CR. 226 p.

González, M. 2017. Una aproximación al producto mineralógico del ambiente edáfico por la acción de los elementos climáticos. *Terra Nueva Etapa*. Vol. XXXIII. Núm. 54. Julio-Diciembre. 189-205 p.

González-Bonorino, F. 1966. Soil clay mineralogy of the Pampa plains, Argentina. *Journal of sedimentary research*. Vol. 36. 4. 1026-1035 p.

Goldich, SS. 1938. A study in rock-weathering. *The Journal of Geology*, 46 (1), 17–58. doi:10.1086/624619

Goldschmidt, V. 1937. The principle of distribution of chemical elements in minerals and rocks *J. Chem. Soc.* 665-673 p.

Grim, RA. 1968. *Clay Mineralogy*, Edit. McGraw-Hill, New York.

Guedes, E; Fernandes, A; Lobato, A; Guedes, R; Costa Netto, J; Moura, A; Marques, D; Ávila, F; Borgo, J. 2014. The chemical properties of a clayey Oxisol from Amazonia and the attributes of its phosphorus fractions. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 1212. 1328-1335 p.

Graham, R. 2006. Factors of soil formation: Topography. In R. Scalenghe (Author) & G. Certini (Eds.). *Soils: Basic Concepts and Future Challenges* 151-164 p. Cambridge: Cambridge University Press.

Guhra, T; Stolze, K; Totsche, KU. 2021. The contribution of biogenic organic matter to aggregation in soil - a review, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-14927, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14927>, 2021.

Hanchard, M. 2018. Digital maps and anchored time. 10.7765/9781526122520.00016.

Hargreaves, GH; Samani, ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1 (2): 96-99 p.

Henríquez, C; Cabalceta, G; Bertsch, F; Alvarado, A. 2017. Principales suelos de Costa Rica. Origen, características y manejo. Editado por la ACCS (Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo). San José, Costa Rica. 7 p.

Hernández Hernández, S; Aguilar Arias, H; Ávila Pérez, I; Acuña López, S; Vargas Solano, Y; Vargas Céspedes, A; Obando Picado, MF; Calvo Elizondo, Y; Jiménez Rodríguez, M; Fernández Garro, J; Fallas Montero, E; Romero Badilla, D; Manrow Villalobos, M; Miller Granados, C. 2022. Informe final del paisaje productivo de pastos año 2019. PRIAS-CONARE–CENAT. San José, Costa Rica. 98 p.

Herrera-Soto, W. 2013. Costa Rica a vista de pájaro: una visión aerográfica y bioclimática a través de paisajes naturales y urbanos. Zamora Murillo, C. (Ed.). 1 Ed. Editorial UCR, UNED, CONARE, PRIAS, CENAT. San José, Costa Rica. 290 p.

Hong, SY; Minasny, Budiman, HK; Yihyun, K; Kyungdo, L. 2013. Predicting and mapping soil available water capacity in Korea. *PeerJ*. 1. e71. 10.7717/peerj.71.

Hultine, KR; Koepke, DF; Pockman, WT; Fravolini, A; Sperry, JS; Williams, DG. 2005. Influence of soil texture on hydraulic properties and water relations of dominant warm-desert phreatophyte. *Tree physiology*. 26. 313 - 323 p.

Ibáñez, S; Gisbert, JM; Moreno, H. 2011a. Oxisoles. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal. 6 p.

Ibáñez, S; Gisbert, JM; Moreno, H. 2011b. Entisoles. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal. 7 p.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2015. Suelos y tierras de Colombia (Vol. 1). [https:// www.igac.gov.co/es/ catalogo/suelos-y-tierrasde- colombia-tomo-1-y-2](https://www.igac.gov.co/es/catalogo/suelos-y-tierrasde-colombia-tomo-1-y-2).

IGN (Instituto Geográfico Nacional). 1980. Hoja cartográfica Buenos Aires 3543 IV. 3 Ed. San José, Costa Rica. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Ikonovic, V. 2001. Importance of education in cartography. Proceedings of the 20th International Cartographic Conference, 6-10 August, Beijing, China.

Imbellone, PA; Aguilera, EY; Beilinson, E. 2017. Suelos y Geología Argentina: Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. Universidad Nacional de Avellaneda Ediciones. Avellaneda, Argentina. 84-101 p.

IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2022. Datos, Estación Meteorológica Planta Volcán, Buenos Aires, Puntarenas. 2014-2020.

INDER (Instituto de Desarrollo Rural). 2014. Región Brunca. Territorio Buenos Aires – Coto Brus. Informe de caracterización del territorio. San José, Costa Rica. 71 p.

Irmak, S; Surucu, A; Aydogdu, IH. 2007. Effects of Different Parent Material on the Mineral Characteristics of Soils in the Arid Region of Turkey. *Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS*. 10. 528-36 p.

Jaimes, W; Navas, G; Salamanca, C; Conde, A. 2003. Estudio detallado de suelos de la estación experimental de Corpoica Sabanas en la Altillanura colombiana. Corpoica, C. I. La Libertad, Villavicencio, Colombia. 62 p.

Janzen, D. 1991. Historia natural de Costa Rica. Traducción Manuel Chavarría A. 1 Ed. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, C.R.

Jaramillo, DF; Parra, LN; González, LH. 1994. El recurso suelo en Colombia: Distribución y evaluación. Universidad Nacional de Colombia.

Jaramillo, DF. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia. 619 p.

Jassó, F; Horváth, B; Izsó, I; Király, L; Parászka, L; Kele, G. 1989. Guidelines for the large-scale soil mapping. Agroiinform, Budapest.

Jelic, MZ; Milivojevic, JZ; Trifunovic, SR; Dalovic, IG; Milosev, DS; Seremesic, SI. 2011. Distribution and forms of iron in the Vertisols of Serbia. *J. Serbian Chem. Soc.* 76 (5): 781-794 p.

Jones, CG; Lawton, JH; Shachak, M. 1994. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* 69, 373-386 p. Wallwork, JA. (1970). *Ecology of Soil Animals*. (McGraw Hill, London).

Jury, WA; Gardner, WR; Gardner, WH. 1991. *Soil Physics*. John Wiley, New York, 328 p.

Ker, JC. 1997. Latossolos do Brasil: Uma Revisão. *Geonomos*- 5, 17–40 p.

Ker, JC; Curi, N; Schaefer, CE; Vidal-Torrado, P. 2015. Pedología: fundamentos. Sociedade Brasileira De Ciencia Do Solo. Viscosa, Minas Gerais. 343 p.

Kesel, RH. 1983: Quaternary History of the río General Valle, Costa Rica. Nat. Geogr. Res. Rep. 15: 339-358 p.

Kesel, RH; Spicer, BE. 1985. Geomorphologic relationships and ages of soils on alluvial fans in the río General Valley. Costa Rica. Catena. 12: 149–166 p.

Khosravani, P; Baghrnejad, M; Abtahi, SA; Ghasemi, R. 2020. Soil Genesis and Classification of Available Soils along a Toposequence in Farsarood Region of Darab City, Fars Province. Iranian Journal of Soil and Water Research. 50(10), 2539-2553 p. doi: 10.22059/ijswr.2019.280278.668186

Kilasara, M; Tessier, D. 1991. Intérêt des mesures physiques sur échantillons non remaniés dans la caractérisation des sols ferrallitiques. Application à la couverture ferrallitique du district de Muhesa (Tanzanie) Cah. Orstom, sér. Pédol. 26:91-103 p.

Kleber, M; Schwendenmann, L; Veldkam, E; Roffner, J; Jahn, R. 2007. Halloysite versus gibbsite: silicon cycling as a pedogenetic process in two lowland Neotropical rain forest soils of La Selva, Costa Rica. Geoderma. 138: 1-11 p.

Kome, G; Oben, T; Enang, RK. 2016. Statistical Relationships and Variability of Selected Properties of Xanthic and Rhodic Ferralsols in a Humid Tropical Forest of Cameroon. International Journal of Agriculture and Forestry. 6. 187-195 p.

Koyel, P; Vibhash, J. 2021. Paradigm Shifts in Geographical Research and Geospatial Applications. Sociedade & Naturez. 33. 10.14393/SN-v33-2021.59651.

Krishnaswamy, J; Richter, DD. 2002. Properties of advanced weathering-stage soils in tropical forests and pastures. Soil Science Society America Journal 66: 244-253 p.

Laffont, JT; Cárcamo, V. 2016. Respuesta de Un suelo Typic Palehumult (Ultisoles) serie Metrenco a la aplicación de Ácido Mono Silícico. Facultad de Agronomía Universidad Adventista del Bio Bio. Chile. Artículo técnico. 4 p.

Lansu, A. 1988. Soil structure under four land use types in the settlement Neguev, Atlantic zone of Costa Rica. 131 CATIE-AUW-MAG. 131 p.

Lapaine, M; Midtbø, T; Gartner, G; Bandrova, T; Wang, T; Shen, J. 2021. Definition of the Map. Advances in Cartography and GIScience of the ICA. 3. 1-6. 10.5194/ica-adv-3-9-2021.

Latham, M. 1982. French soil classifications and their application in the South Pacific Islands. Proceedings of South Pacific Regional Forum on Soil Taxonomy, Suva, Fiji, 2-13 p.

Lawley, R. 2009. The soil - parent material database: A User Guide. British Geological Survey Internal Report, OR/08/034. 45 p.

Leão, TP. 2016. Particle size distribution of Oxisols in Brazil. Geoderma Regional. Volume 7, Issue 2. 216-222 p.

Lekwa, MU; Anene, BO; Lekwa, G. 2004. Chemical and Morphological Soil Characteristics in Drainage Toposequence in Southeastern Nigeria. In Ojeniyi, SO; Ano, AO; Awasalam, DO; Chukwu, GO. (Eds.). Land Degradation, Agricultural Productivity and rural poverty, environmental implications proceedings of the 28th Annual Conference of the Soil Science Society of Nigeria, held at National Root Crops Research Institute, Umudike. Abiah State. Nov. 2003, 4th – 7th.

L'Heureux, JS; Lunne, T. 2020. Characterization and engineering properties of natural soils used for geotesting [J]. AIMS Geosciences, 2020, 6 (1): 35-53 p.

Lima Neto, JA; Ribeiro, MR; Corrêa, MM; Souza-Júnior, VS; de Araújo Filho, JC; de Lima, JFWF. 2010. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos

de latossolos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(2), 473 p.

Lindholm, R. 1987. Mineral identification using X-ray diffraction. En: *A Practical Approach to Sedimentology*. Springer. Dordrecht. 124-153 p.

Loaiza, JC. 2011. El recurso suelo. *Suelos Ecuatoriales*. 41. 6–18 p.

Lund, LJ; Adriano, DC; Pratt, PF. 1974. Nitrate Concentrations in Deep Soil Cores as Related to Soil Profile Characteristics. *Journal of Environmental Quality*. 3: 78-82 p. <https://doi.org/10.2134/jeq1974.00472425000300010021x>

Macedo, J; Bryant, RB. 1987. Morphology, Mineralogy, and Genesis of a Hydrosequence of Oxisols in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 51: 690–698 p. doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100030025x

Macías-Vázquez, F. 1981. Formation of gibbsite in soils and saprolites of temperate humid zones. *Clay Miner.* 16, 43–52 p.

Mangi, J; Bijay-Singh, CM; Stirling, HS; Jagdish, J; Tatarwal, RK; Rajbir, S; López-Ridaura, S; Paresh SB. 2018. Chapter 4. Soil Processes and Wheat Cropping Under Emerging Climate Change Scenarios in South Asia. (Eds.). Donald L. Sparks, *Advances in Agronomy*. Academic Press. Volume 148. 111–171 p.

Maniyunda, LM; Raji, BA; Odunze, AC; Malgwi, WB. 2015. Forms and content of sesquioxides in soils on basement complexes of northern Guinea savanna of Nigeria. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. Vol. 6 (6). 148-157 p. [doi 10.5897/JSSEM13.0428](https://doi.org/10.5897/JSSEM13.0428)

Martín-García, JM; Márquez, R; Delgado, G; Sánchez-Marañón, M; Delgado, R. 2015. Relationships between quartz weathering and soil type (Entisol, Inceptisol and Alfisol) in

Sierra Nevada (southeast Spain). *Eur J Soil Sci*, 66: 179-193 p.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12214>

Mansyur, NI; Hanudin, E; Purwanto, BH; Utami, SNH. 2019. Morphological characteristics and classification of soils formed from acidic sedimentary rocks in North Kalimantan. International Seminar and Congress of Indonesian Soil Science Society. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 393. 10 p.

Mata, R; Rosales, A; Sandoval, D. 2016. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica. CIA, UCR, INTA, IICA.

Mata, R; Rosales, A; Sandoval, D. Vindas, E; Alemán, B. 2022. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica 2022. Esc. 1:200.000. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Matchavariani, L. 2019. The Soils of Georgia. World Soils Book Series. 10.1007/978-3-030-18509-1.

McBratney, AB; Mendonça-Santos, ML; Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117: 3-52 p.

McConnell, C. 2008. Iniciativas de manejo en la subcuenca del río Volcán, cuenca del río Grande de Térraba. Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola. Cartago, Costa Rica. 78 p.

McMillan, I; Gans, P; Alvarado, G. 2004. Middle to present plate tectonic history of the southern Central American Volcanic Arc. *Tectonophysics*, 392: 325–348 p.

MEH (Ministerio de Economía y Hacienda). 1953. Dirección General de Estadísticas y Censos. Atlas Estadístico de Costa Rica. San José, Costa Rica. 114 p.

Mibei, G. 2014. Introduction to types and classification of rocks. Presented at Short Course IX on Exploration for Geothermal Resources, Organized by UNU-GTP, GDC and Ken Gen, at Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya, Nov. 2-24 p.

Mikhailova, EA; Zurqani, HA; Post, CJ; Schlautman, MA; Post, GC; 2021. Soil Diversity (Pedodiversity) and Ecosystem Services. *Land* 10 (3): 288 p.
<https://doi.org/10.3390/land10030288>

Mill, JS. 1925. *A system of logic*, 8 Ed. Longmans, Green, and Co., Londres.

Miller, W. 2011. *Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects*. (1 Ed.). Elsevier. Italy. 632 p.

Moameni, A. 1999. *Soil quality changes under long term wheat cultivation in the Marvdasht plain, south-central Iran [Ph.D. dissertation]* Ghent University, Ghent, Belgium. 284 p.

Molina, DL; Amézquita, E; Hoyos, P. 2003. Construcción de capas arables en suelos Oxisoles de la Altillanura colombiana. En: Lobo Luján, D; Gabriels, D; Soto, G (Eds.). *Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo*. UNESCO. *Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo*. Documentos Técnicos en Hidrología del PHI Serie n.71. La Serena, Chile. 113-127 p.

Molina, E; Meléndez, G. 2002. *Tabla de interpretación de análisis de suelos*. Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), Universidad de Costa Rica (UCR).

Mondal, B. 2021. *Concept and approaches in soil science study and soils of India*.

Moon, D. 2020. *Soil Science I*. In *The American Steppes: The Unexpected Russian Roots of Great Plains Agriculture, 1870s–1930s (Studies in Environment and History*, pp. 188-225). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781316217320.006

Moore, D; Reynolds, RC. 1997. X-ray diffraction and the Identification and analysis of clay minerals, 2 Ed. Oxford University Press, New York.

Mora, S. 1979a: Estudio geológico de una parte de la región sureste del Valle del General, provincia de Puntarenas. Tesis para optar por el grado académico de Licenciado en Geología. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. 188 p.

Mora, S. 1979b. Proyecto Hidroeléctrico de Boruca. Estudio Geológico Regional. Instituto Costarricense de Electricidad, San José.

Moral, JF; Rebollo, FJ. 2017. Characterization of soil fertility using the Rasch model. Journal of soil science and plant nutrition. 17 (2), 486–498 p.

Moreno, H; Ibáñez, S. 2020. Soil Taxonomy: Nomenclatura y principios de clasificación de los suelos. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal. 10 p.

Morris, M; Comeau, A; Ammons, J; Blair, R; Changsheng, L. 2010. A Comparison of Three Soil Characterization Methods on a Soil Formed in Sandy Glacial Outwash. Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy. Volume 15. Article 28.

Moscote, YP; Morón, JA; Madiedo, GC; Rojas, EE; Córdoba, AJ; Manco, DC. 2018. Evidencias mineralógicas y geoquímicas de las manifestaciones de hierro hospedadas en La Unidad Riodacita de los Tábanos sector de Corral de Piedras, San Juan del Cesar, La Guajira. Prospectiva. Vol. 16 - No. 1. Enero–Junio. 67–75 p.

Muggler, CC; Pape, TH; Buurman, P. 1997. Laser grain-size determination in soil genetic studies 2. Clay content, clay formation, and aggregation in some brazilian oxisols. Soil Science. 162 (3): 219-228 p.

Nanzyo, M; Kanno, H. 2018. Inorganic Constituents in Soil: Basics and visuals. Springer Open. Springer Singapore 178 p.

Ndzana, GM; Huang, L; Zhang, Z; Zhu, J; Liu, F; Bhattacharyya, R. 2019. The transformation of clay minerals in the particle size fractions of two soils from different latitude in China. CATENA. Volume 175. 317-328 p. doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.026.

Neves, CS; Feller, C; Guimarães, MF; Medina, C; Filho, J; Fortier, M. 2003. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the Cropping Profile Method in clayey Oxisols in Brazil. Soil and Tillage Research. 71. 109-119 p.

Nieto, JA. 2014. El ABC de los suelos para no expertos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia 130 p.

Nieuwenhuysse, A. 1996. Soils, geology, and soil-related sustainability aspects of the perhumid tropical Limón basin, Costa Rica. Serie Técnica. Informe Técnico. No. 272. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 85 p.

Nortcliff, S; Hulpke, H; Bannick, CG; Terytze, K; Knoop, G; Bredemeier, M; Schulte-Bisping, H; Auerswald, K; Litz, N; Mayer, R; Stoy, A; Kassem, A; Kerndorff, H; Crössmann, G; Eikmann, T; Franzius, V; Grimsky, D; Möhlenbruch, N; Dworshak, PC. 2006. Soil, Definition, Function, and Utilization of Soil. 10.1002/14356007.b07_613.pub2

Nurcholis, M. 2010. Development of Halloysite/Smectite Mixed Layer Mineral in Paleudult of Java Island. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. August 2010, Brisbane, Australia. 47–49 p.

Obando, LG; Kussmaul, S. 2009a. Geología de la hoja Buenos Aires, Costa Rica. Revista Geológica de América Central. 41: 123-136 p.

Obando, LG; Kussmaul, S. 2009b. Mapa geológico de la hoja Buenos Aires, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. 41: 2 p.

Orrillo, M. 2014. Clasificación geoquímica de Goldschmidt. *Cristalografía - Ingeniería de minas*. Universidad Nacional de Cajarma.

Osodeke, VE; Nwotiti, IL; Nuga, BO. 2005. Sesquioxides distribution along a toposequence in Umudike area of Southeastern Nigeria. *Electr. J. Environ. Agric. Food Chem.* 4 (6): 1117-1124 p.

Ozsoy, G; Aksoy, E. 2011. Genesis and classification of Entisols in Mediterranean climate in Northwest of Turkey. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 9. 998-1004 p.

Pacheco, R. 1990. El manejo de suelos de baja fertilidad con énfasis en los Ultisoles del Valle del General. 1 Seminario sobre el Manejo de Suelos Tropicales: Posibilidades y limitaciones ecológicas, GOETHEPRODAF (GTZ) - UNED (PEA). San José, Costa Rica. 16 p.

Paz, CG; Rodríguez, TT. 2008. Factors of Soil Formation. In: Chesworth, W. (Eds.). *Encyclopedia of Soil Science*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_207

Pelt, E; Chabeaux, F; Innocent, C; Navarre, AK; Sak, PB; Brantley, SL. 2008. Uranium-thorium chronometry of weathering rinds: rock alteration rate and paleo-isotopic record of weathering fluids. *Earth and Planetary Science Letters*. 276: 98-105 p.

Peters, W. 1973. Suelos y ecosistemas del Trópico Húmedo. *Revista de la Facultad de Agronomía* Vol. 2. No. 3. Enero-Diciembre. 69-85 p.

Phiri, S; Amézquita, E; Rao, IM; Singh, BR. 2001. Disc harrowing intensity and its impact on soil properties and plant growth of agropastoral systems in the Llanos of Colombia. *Soil Till. Res.* 62, 131-143 p.

Poppiel, RR; Lacerda MPC; Oliveira Junior, MP; Demattê, JAM; Romero, DJ; Sato, MV; Almeida Júnior, LR; Cassol LFM. 2018. Surface spectroscopy of Oxisols, Entisols and Inceptisol and relationships with selected soil properties. *Rev. Bras. Cienc. Solo.* 42:e0160519.

Pragana, R; Souza, JV; Moura, R; Soares, J. 2016. Characterization of yellow latosols (Oxisols) of Serra do Quilombo, in Piauí State Savanna Woodlands-Brazil. *Revista Caatinga.* 29. 832-840 p.

Prasetyo, BH; Suharta, N; Subagyo, H; Hikmat, H. 2016. Chemical and mineralogical properties of Ultisols of Sasamba area, east Kalimantan. *Indonesian Journal of Agricultural Science.* 7-47 p.

Prasetyo, BH; Suharta, N. 2004. Properties of low activity clay soils from South Kalimantan. *Indonesian Journal of Agricultural Science.* 2. 37-47 p.

Protti, R. 1996. Evidencias de glaciación en el Valle del General (Costa Rica) durante el Pleistoceno Tardío. *Revista Geológica de América Central.* 19/20: 75-85 p.

Purwanto, S; Gani, RA; Suryani, E. 2020. Characteristics of Ultisols derived from basaltic andesite materials and their association with old volcanic landforms in Indonesia. *Sains Tanah Journal of Soil Science and Agroclimatology,* 17 (2): 135-143 p.

Putnis, A; Austrheim. H. 2010. Fluid-induced processes: metasomatism and metamorphism. *Geofluids.* 10. 254–269 p.

Quesada-Román, A. 2016. Peligros geomorfológicos: Inundaciones y procesos de ladera en la Cuenca Alta del río General, Pérez Zeledón, Costa Rica. Tesis para optar por el grado de: Maestro en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México D. F. 157 p.

Ramírez, ER. 2016. Génesis, morfología, clasificación y susceptibilidad de suelos de la parte media de la Cuenca del río Abujao Región Ucayali. Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en Suelos. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.

Ramos, V. 1998. Estudio geológico integral del pueblo de Bonanza y alrededores, cantón de Coto Brus, Provincia de Puntarenas, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Inf. Campaña Geológica. San José, Costa Rica. 111 p.

Ratke, R; Alcinei Campos, R; Inda, RA; Barbosa, JR; Silva, Y; César, JN; Silva, JJ; Batista, S. 2020. Agricultural potential and soil use based on the pedogenetic properties of soils from the Cerrado-Caatinga transition Aptidão agrícola e uso do solo baseado nas propriedades pedogenéticas de solos da transição Cerrado-Caatinga. SEMINA: CIENCIAS AGRARIAS. 41. 1119-1134 p.

Reichert, JM; Suzuki, LEAS; Reinert, DJ; Horn, R; Håkansson, I. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. Soil and Tillage Research. 102 (2), 242-254 p.

Riedmüller, G. 1978. Neoformations and transformations of clay minerals in tectonic shear zones, TPM Tschermaks Min. Petr. Mitt. 25, 219–242 p.

Rodríguez, Y. 2018. Estudio del efecto de la modificación química de vermiculita (VMC) y la procesabilidad de nanocompuestos de almidón termoplástico (ATP)/vermiculita. Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Tecnología de Polímeros. Saltillo, Coahuila. México. 85 p.

Rosenqvist, J. 2002. Surface chemistry of Al and Si (hydr) oxides, with emphasis on nano-sized gibbsite (α -Al (OH)₃). Department of Chemistry, Inorganic Chemistry. Umeå University. Umeå, Sweden. 73 p.

Rozas-López, JL. 2010. Diccionario de términos edafológicos. Vol 1. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. España. 544 p.

Rubiano, Y. 2005. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad del suelo. Herramienta SIG para apoyo a la planificación, uso y manejo del suelo. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Palmira, Valle, Colombia. 35 p.

Salazar, C. 2015. Caracterización de los principales suelos de la Cuenca del río Savegre, Costa Rica. Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica. 203 p.

Salgado de la Parra, PC. 2019. Herencia mineralógica del material parental en los filosilicatos secundarios presentes en suelos vitivinícolas de la zona central de Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento Ciencias de la Tierra. Concepción, Chile. 205 p.

Salimon, CI; Wadt, PGS; de Souza Alves, S. 2009. Decrease in carbon stocks in an oxisol due to land use and cover change in southwestern Amazon. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. Vol. 4. Num. 2, 2009. 57-65 p.

Sánchez, R; Gómez, C; Palacios; A. Otero, J; Cocomá, N; Bejarano, MC. 2012. Programa nacional de monitoreo y seguimiento de la degradación de suelos y tierras en Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia. 13 p.

Santos, HG; Jacomine, PKT; Anjos, LHC; Oliveira, VA; Lumbrreras, JF; Coelho, MG; Almeida, JA; Araújo-Filho, J; Oliveira, JB; Cunha, T. 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos –SiBCS (5 Ed.). Rio de Janeiro: EMBRAPA.

Santos, RD; Lemos, RC; Santos, HG; Ker, JC; Anjos, LHC; Shimizu, SH. 2013. Manual de descrição e coleta de solos no campo (6 Ed.). Brazilian Society of Soil Science.

Schaefer, C; Fabris, J; Ker, J. 2008. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): A review. *Clay Minerals-CLAY MINER.* 43. 137-154 p.

Sarmadian, F; Mousavi, SR; Keshavarzi, A; Sadeghnejad, M. 2014. Investigation the variation of soil mapping units using geopedological approach. *Acta Advances in Agricultural Sciences.* 2. 1–9 p.

Schaefer, C; Fabris, JM; Ker, J. 2008. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): A review. *Clay Minerals*, 43 (1), 137-154. doi:10.1180/claymin.2008.043.1.11

Schaetzl, R; Anderson, S. 2005. *Gensis and geomorphology*, Cambridge University Press, New York, 817 p.

Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. *Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0*. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE. *Natl. Soil Surv. Ctr.*, Lincoln, NE (September).

Scull, P; Franklin, J; Chadwick, OA; McArthur, D. 2003. Predictive soil mapping: a review. *Prog. Phys. Geog.*, 27: 171–97 p.

Segura-Serrano, L. 2014. Conocimiento de la dinámica fluvial como herramienta para la planificación territorial. Caso río Volcán, Buenos Aires, Puntarenas, Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha.* 27. 12. 10.18845/tm.v27i0.2010.

Shabbir, S; Samira, O. 2022. Families and Series Differentiae. In: *Kuwait Soil Taxonomy*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95297-6_4

Sherrod, DR; Vallance, JW; Tapia, A; McGeehin, JP. 2008. Volcán Barú, eruptive history and volcano-hazards assessment. Reston, Virginia. U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1401. 33 p.

Shirozu, H. 1988. Introduction to clay mineralogy. Fundamentals for clay science, Asakura Pub. Japan, 185 p.

Singh, S; Tripathi, DK; Singh, S; Sharma, S; Dubey, NK; Chauhan, DK; Vaculík, M. 2017. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 177-193 p.

Siqueira, R; Ferreira, M; Alcântara, E; Silva, B; Silva, R. 2014. Water retention and S index of an Oxisol subjected to weed control methods in a coffee crop. *Ciência e Agrotecnologia*. 38. 471-479 p.

Srivitmaitrie, C; Puppala, AJ; Chikyala, V; Saride, S; Hoyos, LR. 2008. Combined lime and cement treatment of expansive soils with low to medium soluble sulfate levels. American Society of Civil Engineers, Proceedings of the Geo Congress. 646-653 p.

Srivitmaitrie, C; Puppala, AJ; Saride, S; Hoyos, L. 2011. Combined lime-cement stabilization for longer life of low volume roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2204 (1): 140-147 p.

Smith, GD. 1968. Soil classification in the United States. World soil resources report 32. FAO, Roma, Italia. 6-24 p.

Soca, M; Daza-Torres, CM. 2016. Evaluation of particle size fractions and doses of zeolite for agriculture. *Agrociencia*. 50 (8), 965-976 p.

Soil Survey Laboratory Methods Manual. 2006a. SSIR No. 42. *USDA Natural Resources Conservation Service*. U. S. Govt. Printing Office, Washington, D. C, USA.

Soil Survey Staff. 1993. Soil Survey Manual. USDA Handbook No. 18, US Government Printing Office, Washington, D. C.

Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. USDA-NRCS Agriculture Handbook No. 436, 2nd ed. US Government Printing Office, Washington, D. C.

Soil Survey Staff. 2004. Soil Survey Investigation. Report No. 42. Version 4.0. Nov. 204. 443–444 p.

Soil Survey Staff. 2006b. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. (20 Ed.). Washington, D. C, USA. 341 p.

Soil Survey Staff. 2022. Keys to Soil Taxonomy, 13 edition. USDA Natural Resources Conservation Service.

Solano, F; Acuña, R. 1993. Estudio de erosión hídrica y evaluación de prácticas de conservación de suelos bajo cultivo de piña (*Ananas comosus*) Buenos Aires, Puntarenas. Departamento de Geografía. Universidad de Costa Rica. 140 p.

Solano, J; Villalobos, G. 2001. Aspectos fisiográficos básicos para las principales regiones de Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. 15.

Sprechmnan, P. 1984. Manual de Geología de Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica.

Srinivasan, R; Natarajan, A; Anil Kumar, KS; Kalaivanan, D. 2013. Characterization of major cashew-growing soils of Dakshina Kannada district of Karnataka. *Agropedology*. 23 (2), 59-64 p.

Szabolcs, I. 1966. Methodology of the genetic farm scale soil mapping. OMMI Genetikus Talajtérképek. Ser, 1.

Sufardi, S; Arabia, T; Khairullah, K; Apriani, I. 2021. Particle size distribution and clay minerals in dryland soils of Aceh Besar, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 922. Banda Aceh, Indonesia.

Sultan, K. 2006. Clay Mineralogy of Central Victorian (Creswick) Soils: Clay Mineral Contents as a Possible Tool of Environmental Indicator, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 15:4, 339-356, DOI: 10.1080/15320380600751702

Sumono, L; Puspita, P; Nasution, D. 2018. Revamping of Entisol soil physical characteristics with compost treatment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Suswati, D; Sagiman, S; Udin, S. 2015. Effect of coastal sediment to nutrient availability and maize productivity on Entisols. AGRIVITA Journal of Agricultural Science. 37. 10.17503/agrivita.v37i3.460.

Tagami, K; Twining, J; Wasserman, M. 2012. Terrestrial Radioecology in Tropical Systems. Radioactivity in the Environment, Elsevier, Volume 18, 155-230 p.

Tavares Filho, J; Tessier, D. 2010. Effects of different management systems on porosity of Oxisols in Paraná, Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34. 899-906 p.

Tawornpruek, S; Kheoruenromne; I; Suddhiprakarn, A; Gilkes. RJ. 2005. Microstructure and water retention of Oxisols in Thailand. Australian Journal of Soil Research. 43, 973–986 p.

TEC (Instituto Tecnológico de Costa Rica). 2014. Atlas Digital de Costa Rica.

Tóth, G; Montanarella, L; Stolbovoy, V; Máté, F; Bódis, K. Jones, A; Van Liedekerke, M. 2008. Soils of the European Union. JRC Scientific and Technical Reports. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Townsend, FC; Manke, PG; Parcher, JV. 1971. The influence of sesquioxides on lateritic soil properties. Highway Research Board. 80–92 p.

Thompson, J; Roecker, S; Grunwald, S; Owens, PR. 2012. Digital Soil Mapping. 10.1016/B978-0-12-386941-8.00021-6.

Tuller, M. 2005. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents. Water Resources Research. 41:1-6 p.

Ulloa, A; Delgado; CE. 2010. Características geoquímicas y mineralogía de las rocas magmáticas del flanco Pacífico Central de la Cordillera de Talamanca: Implicaciones para la evolución de una corteza continental. Tesis para optar por el grado académico de Licenciado en Geología. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. 177 p.

USDA-SCS. 1999. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Internal Report. Washington, D. C. 754 p.

USDA. 2012. Soil survey laboratory primary characterization, data of some Costa Rican soils. *Internal Report*. Lincoln, Nebraska. sp.

USDA (United States Department of Agriculture). 2017. Soil Survey Manual by Soil Science Division Staff. Washington, D. C.

van Uffelen, JG. 1993. A geological, geomorphological and soil transect study of the Chirripo massif and adjacent areas, Cordillera de Talamanca, CR. Master's Thesis. Wageningen University, Wageningen, NL. 72 p.

Vásquez, A. 1990. Estudio detallado de suelos y clasificación de tierras para riego: evaluación de los recursos de tierras y aguas con fines de riego. Tomo 1. Central Azucarera Tempisque S.A., Liberia, Guanacaste. 142 p.

Velde, B. 1995. Composition and mineralogy of clay minerals. Origin and mineralogy of clays: New York, Springer-Verlag. 8–42 p.

Vladychenskiy, AS. 2011. Genesis of Soils and Factors of Soil Formation. Encyclopedia of Life Support Systems. 6 p.

Voncir, N; Kparmwang, T; Amba AA; Hassan, AM. 2006. Variation in Morphological Properties and Particle Size Distribution of Alfisols, Inceptisols and Entisols in the Gubi Soil Series, Bauchi, Nigeria. Journal of Applied Sciences. 6 p.

Watanabe, T; Funakawa, S; Kosaki, T. 2010. Distribution and formation conditions of gibbsite in the upland soils of humid Asia: Japan, Thailand and Indonesia. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. August. Brisbane, Australia. 17–20 p.

West, LT; Sumner, FBM; Kang, BT. 1997. Ultisols: Characteristics and impacts on society. Advances in agronomy. 63: 179-239 p.

Weyl, R. 1957. Contribución a la geología de la Cordillera de Talamanca. Instituto Geográfico Nacional (IGN). San José, Costa Rica. 75 p.

Wilcke, W; Kretschmar, S; Bundt, M; Saborío, G; Zech, W. 2000. Depth distribution of aluminum and heavy metals in soils of Costa Rica coffee cultivation areas. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 163: 499-502 p.

Williams, H; Turner, FJ; Gilbert, CM. 1982. Petrography: An introduction to the study of rocks in thin section. WH Freeman and Company.

Williamson, WTH. 1959. The discipline of soil science. *Journal of Soil Science*, 10: 1-4 p.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1959.tb00660.x>

Wilson, MA; Burt, TD; Thomas, JE. 1999. Volcanic Glass Analyses of Multiple Fine-Earth Fractions. *Soil Survey Horizons*. Volume 40. Issue 2. 29-35 p.

Yitbarek, T; Beyene, S; Tsehai, K. 2016. Characterization and Classification of Soils of Abobo Area, Western Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*. 2016. 1-16 p.

Zenero, M; Simões da Silva, LF; de Pierri Castilho, SC; Vidal, A; Grimaldi, M; Cooper, M. 2016. Characterization and Classification of Soils under Forest and Pasture in an Agroextractivist Project in Eastern Amazonia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. (40). 1-17 p.

Zhang, YY; Wu, W; Liu, H. 2019. Factors affecting variations of soil pH in different horizons in hilly regions. *PloS one*, 14(6), e0218563. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218563>

Zhao, Y; Peth, S; Krümmelbein, J; Horn, R; Wang, Z; Steffens, M; Hoffmann, C; Peng, X. 2007. Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland. *Ecol Model*. 205(1-2): 241–254 p.

Zúñiga, FD; Valle, SR; Dörner, J; MacDonald, R. 2014. Estabilidad estructural de un Andisol (Typic Durudand) bajo bosque nativo y pradera en el Sur de Chile. *Agro Sur* 42: 55- 66 p.

Anexos

Anexo 1. Tabla de interpretación de análisis de (Meléndez y Molina 2002).

		Bajo	Medio	Óptimo	Alto
pH		< 5	5 - 6	6 - 7	> 7
Ca	cmol/L	< 4	4 - 6	6 - 15	> 15
Mg	cmol/L	< 1	1 - 3	3 - 6	> 6
K	cmol/L	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 0.8	> 0.8
Acidez	cmol/L		0.3 - 1	< 0.3	> 1
S. A.	%		10 - 30	< 10	> 30
P	mg/L	< 10	10 - 20	20 - 50	> 50
Fe	mg/L	< 5	5 - 10	10 - 50	> 50
Cu	mg/L	< 0.5	0.5 - 1	1 - 20	> 20
Zn	mg/L	< 2	2 - 3	3 - 10	> 10
Mn	mg/L	< 5	5 - 10	10 - 50	> 50
B	mg/L	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1	> 1
S	mg/L	< 12	12 - 20	20 - 50	> 50
MO	%	< 2	2 - 5	5 - 10	> 10
RELACIONES CATIONICAS		Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K
		2-5	5-25	2.5-15	10-40

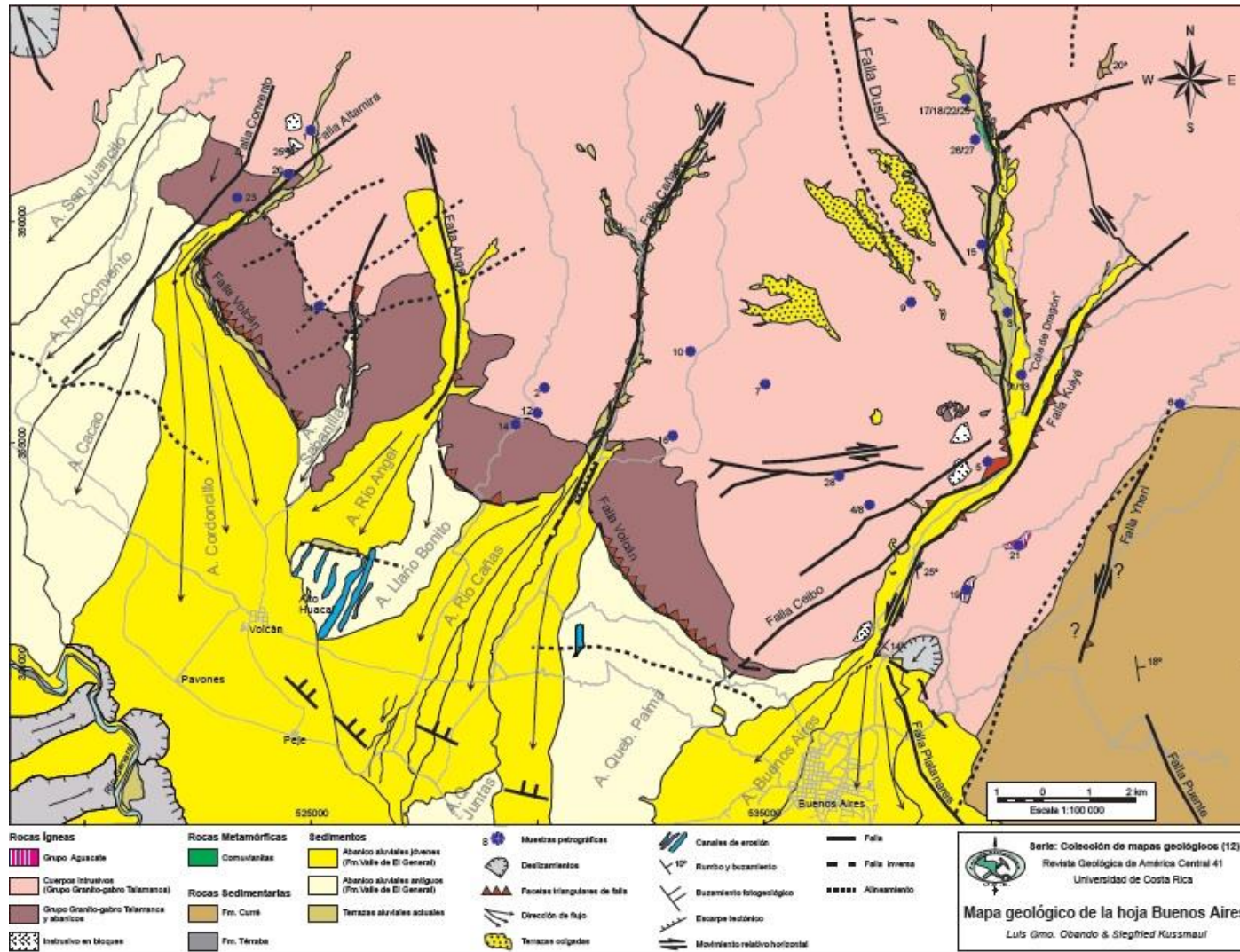
Anexo 2. Regímenes de temperatura del suelo, tomado de Schoeneberger *et al.* (2012)

Soil Temperature Regimes ¹	Soil Temperature Classes ²	Criteria: MAST ³ measured at 50 cm or at the upper boundary of a root-limiting layer if shallower
<i>For soils with a difference between mean summer and mean winter soil temperature of <6 °C:</i>		
Isofrigid	Isofrigid	<8 °C
Isomesic	Isomesic	8 to <15 °C
Isothermic	Isothermic	15 to <22 °C
Isohyperthermic	Isohyperthermic	≥22 °C

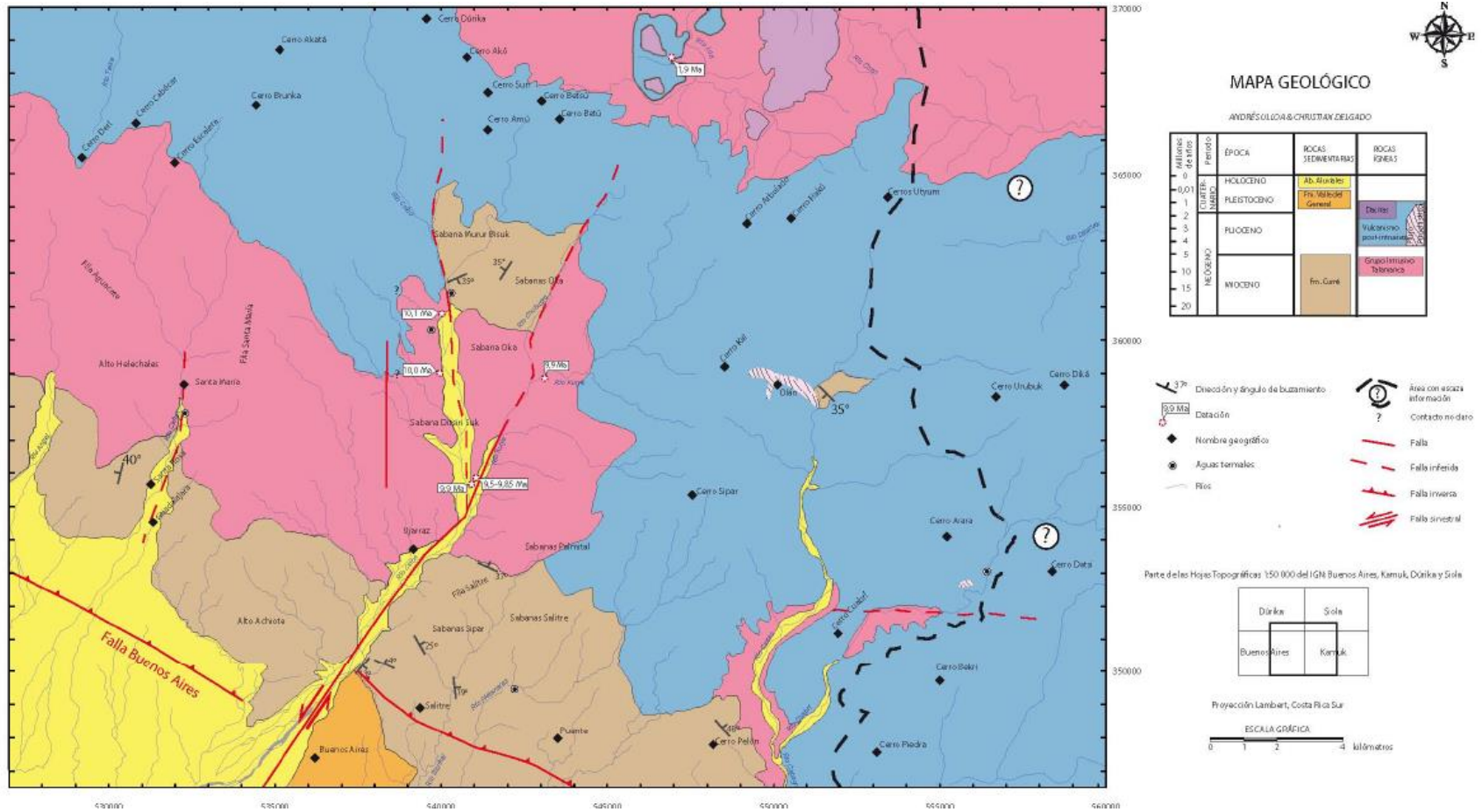
Anexo 3. Hoja cartográfica Buenos Aires. Fuente: IGN (1980).



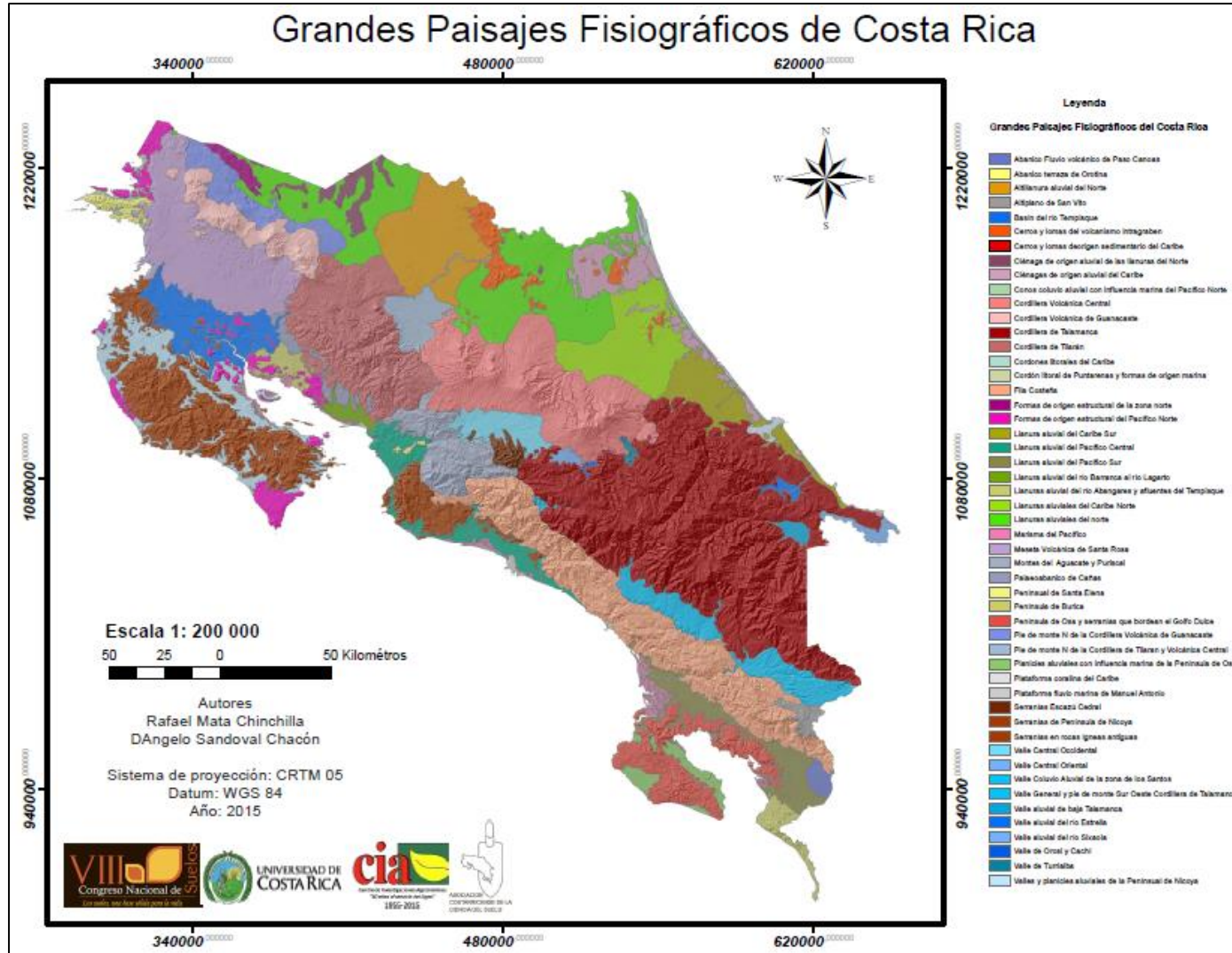
Anexo 4. Mapa geológico de la hoja Buenos Aires. Fuente: Obando y Kussmaul (2009).



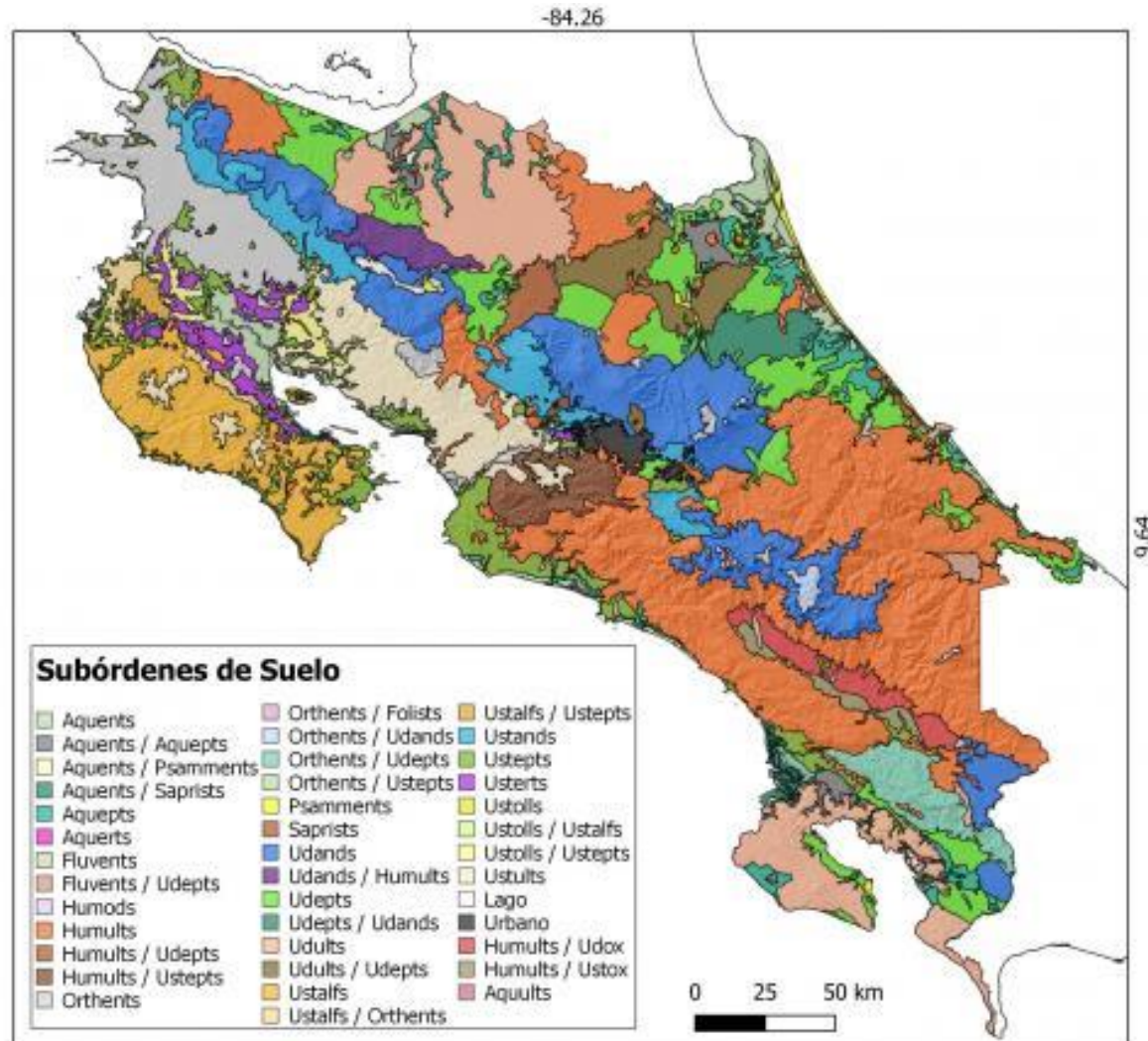
Anexo 5. Mapa geológico del flanco Pacífico Central de la Cordillera de Talamanca. Fuente: Ulloa y Delgado (2010).



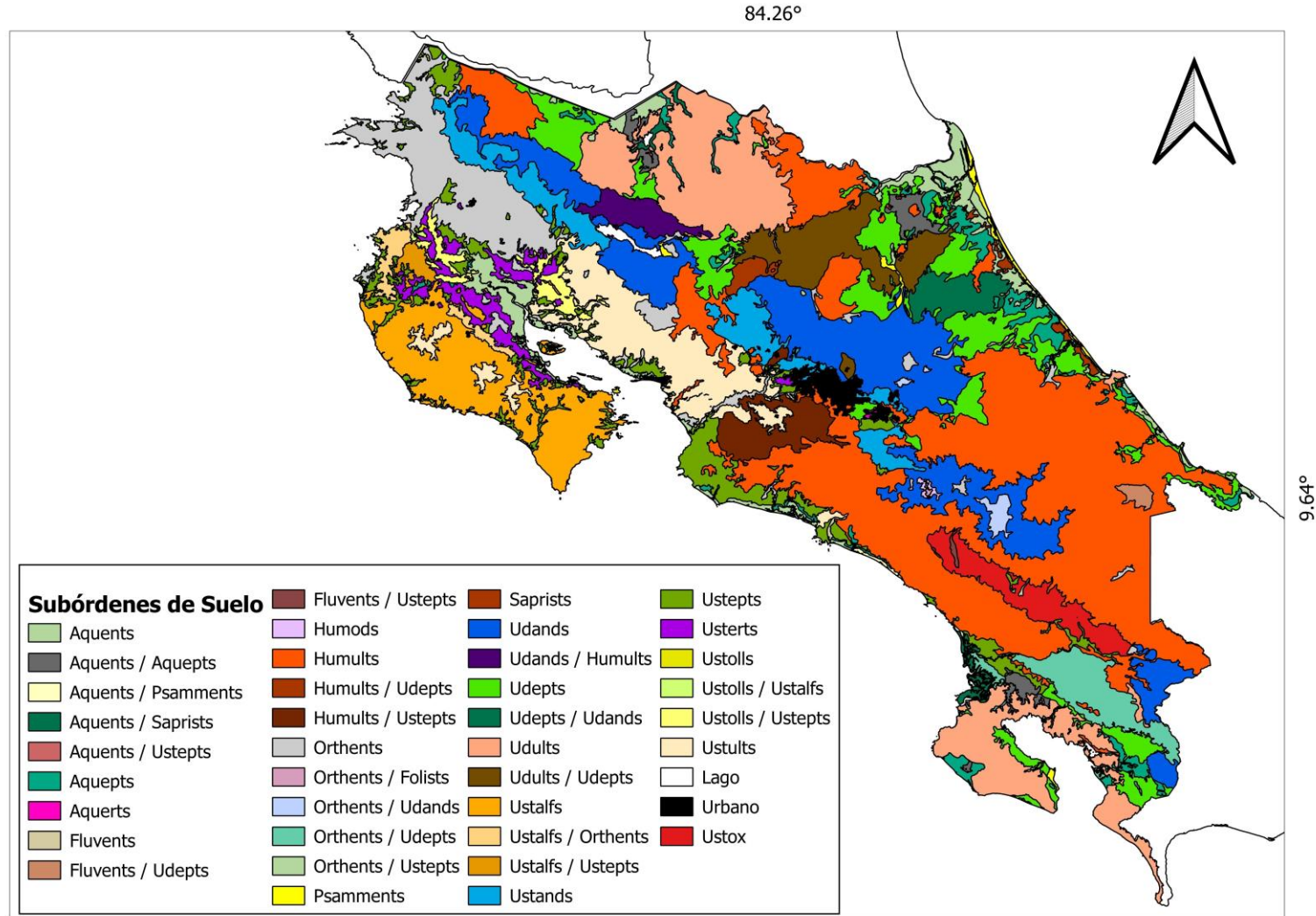
Anexo 7. Mapa de grandes paisajes fisiográficos de Costa Rica (escala 1:200.000). Fuente: Mata y Sandoval (2015).



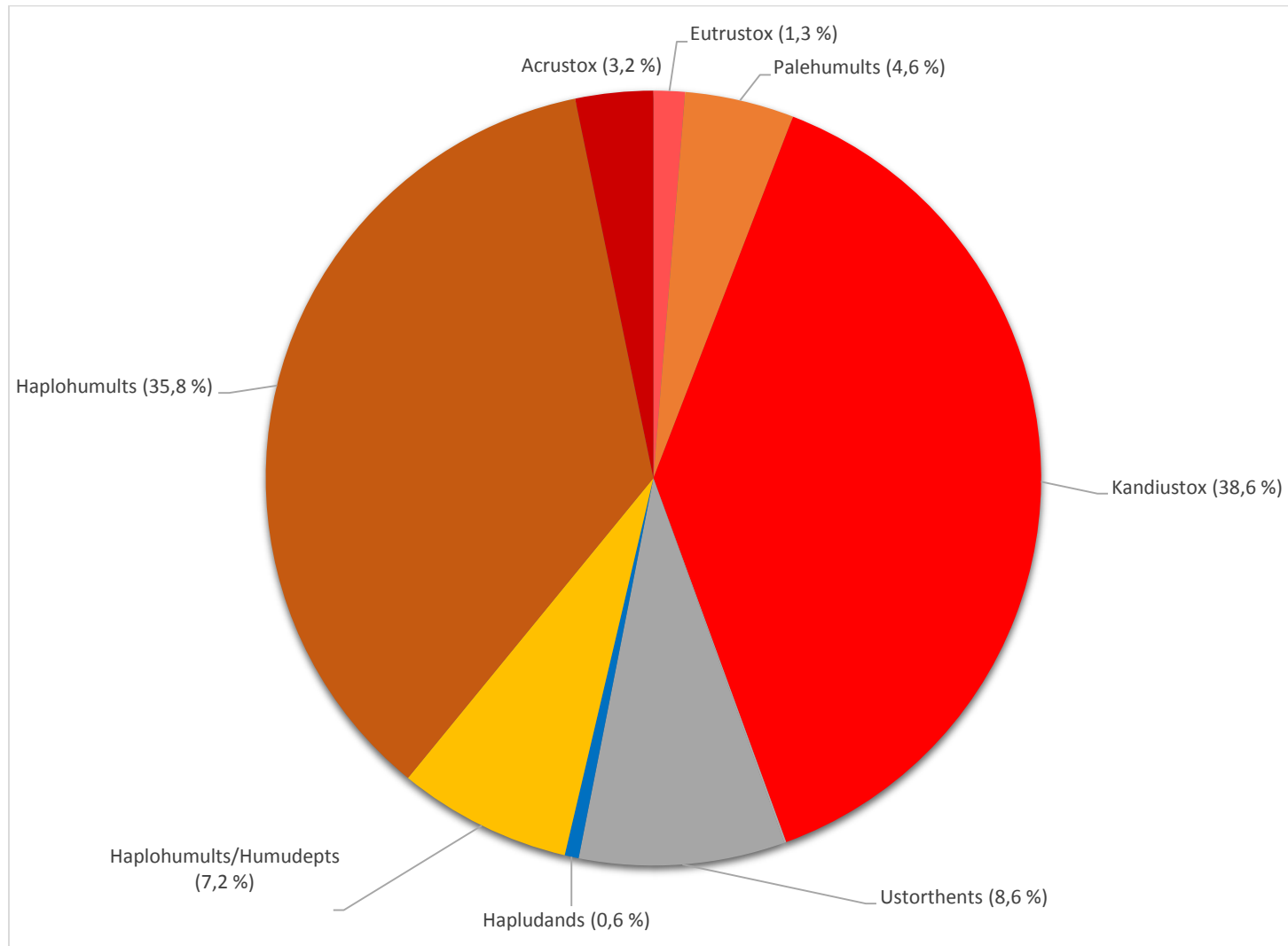
Anexo 8. Mapa de subórdenes de suelos de Costa Rica (escala 1:200.000). Fuente: Mata *et al.* (2020).



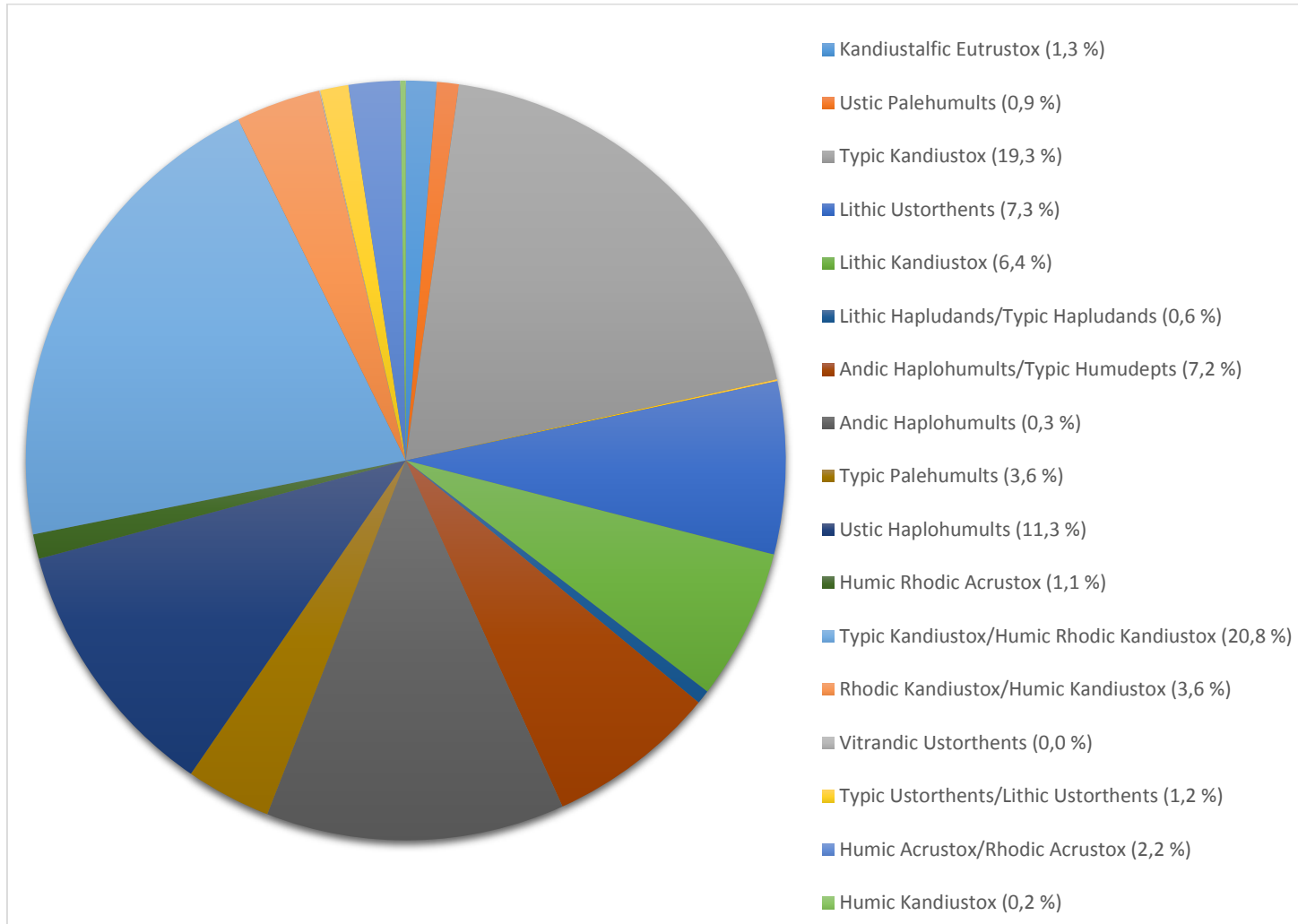
Anexo 9. Mapa de subórdenes de suelos de Costa Rica (escala 1:200.000). Fuente: Mata *et al.* (2022).



Anexo 10. Porcentaje de dominancia de los grandes grupos de suelo encontrados en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas.



Anexo 11. Porcentaje de dominancia de los subgrupos de suelo encontrados en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas.



Anexo 12. Porcentaje de dominancia de las familias de suelo encontradas en el área de estudio, Buenos Aires de Puntarenas.

