

INFLUENCIA DE TRES MODELOS AGROECOLÓGICOS SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO EN EL MUNICIPIO DE OCAÑA, NORTE DE SANTANDER

Ana Francisca González-Pedraza
Leónides Castellanos González
Alfonso Eugenio Capacho



UNIVERSIDAD
DE PAMPLONA

Influencia de tres modelos agroecológicos sobre la calidad
del suelo en el municipio de Ocaña, Norte de Santander

Influencia de tres modelos agroecológicos sobre la calidad del suelo en el municipio de Ocaña, Norte de Santander

Ana Francisca González-Pedraza
Leónides Castellanos González
Alfonso Eugenio Capacho



Influencia de tres modelos agroecológicos sobre la calidad del suelo en el municipio de Ocaña, Norte de Santander / Ana Francisca González-Pedraza, Leónides Castellanos González, Alfonso Eugenio Capacho -- Pamplona: Universidad de Pamplona. 2023.

189 p. ; 17 cm x 24 cm.

ISBN: 978-628-7656-07-9

© Universidad de Pamplona

Sede Principal Pamplona, Km 1 Vía Bucaramanga-Ciudad Universitaria. Norte de Santander, Colombia.

www.unipamplona.edu.co

Teléfono: 6075685303

Influencia de tres modelos agroecológicos sobre la calidad del suelo en el municipio de Ocaña, Norte de Santander

ISBN: 978-628-7656-07-9

Primera edición, noviembre 2023

Colección Ciencias Pecuarias y Agronomía

© Sello Editorial Unipamplona

Rector: Ivaldo Torres Chávez Ph.D

Vicerrector de Investigaciones: Aldo Pardo García Ph.D

Jefe Sello Editorial Unipamplona: Caterine Mojica Acevedo

Corrección de estilo: Andrea del Pilar Durán Jaimes

Diseño y Diagramación: Laura Angelica Buitrago Quintero

Hecho el depósito que establece la ley. Todos los derechos reservados. Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin permiso del editor.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a todas las instituciones que prestaron apoyo a esta investigación, en especial a la Gobernación de Norte de Santander en cabeza del Dr. William Villamizar Laguado, a la Secretaría de las TIC bajo la dirección de la Dra. Marina Lozano Roper, al Sistema General de Regalías, Colciencias, a la Universidad de Pamplona y su rector Dr. Ivaldo Torres Chávez, a la Universidad Francisco de Paula Santander y a la Alcaldía del municipio de Ocaña, por brindar los recursos logísticos, económicos y técnicos para realizar el Proyecto del Convenio Especial de Cooperación 00356 “Desarrollo estratégico agroecológico con uso de TIC para el fortalecimiento de cultivos promisorios en el departamento de Norte De Santander, Proyecto Plantar”.

También agradecemos al equipo técnico conformado por los ingenieros y técnicos de campo del municipio de Ocaña, dirigidos por el Coordinador técnico del Proyecto Plantar MSc. Carlos Germán Delgado Méndez. A Luisa Fernanda Lozano Leal por su trabajo en estadística, al equipo de comunicación social y administrativo y financiero del Proyecto Plantar, a los responsables de la toma de fotos multiespectrales y, en fin, a todos los que de una forma u otra participaron en alguna tarea del mismo.

Por último, un agradecimiento especial a las 15 familias de agricultores beneficiarios quienes pusieron sus fincas a disposición para el desarrollo exitoso del proyecto.

CONTENIDO

Agradecimientos	5
Contenido	7
Índice de figuras	11
Índice de tablas	13
Prólogo	17
Síntesis	21
Introducción	25
Capítulo I	27
Marco teórico	29
1.1. Una mirada hacia la calidad del suelo	29
1.1.1. Indicadores de calidad de los suelos	31
1.1.2. Indicadores físicos de calidad de los suelos	32
1.1.3. Estructura del suelo	33
1.1.4. Estabilidad de los agregados del suelo	33
1.1.5. Infiltración de agua en el suelo	33
1.1.6. Color del suelo	34
1.1.7. Densidad aparente del suelo	35
1.1.8. Porosidad del suelo	35
1.1.9. Contenido de agua del suelo	35
1.1.10. Conductividad hidráulica del suelo	36
1.1.11. Indicadores químicos de calidad de los suelos	36
1.1.12. pH del suelo	37
1.1.13. Materia Orgánica del Suelo (MOS)	38
1.1.14. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	39
1.1.15. Bases o cationes intercambiables	40
1.1.16. Porcentaje de Saturación de Bases (PSB)	41
1.1.17. Nutrientes esenciales para las plantas	41
1.1.18. Nitrógeno (N)	42
1.1.19. Fósforo (P)	43

1.1.20. Potasio (K)	43
1.1.21. Calcio (Ca).	44
1.1.22. Magnesio (Mg)	45
1.1.23. Azufre (S)	45
1.1.24. Hierro (Fe)	46
1.1.25. Manganeso (Mn)	46
1.1.26. Boro (B)	47
1.1.27. Molibdeno (Mo)	47
1.1.28. Cobre (Cu)	47
1.1.29. Zinc (Zn)	48
1.1.30. Cloro (Cl)	48
1.1.31. Níquel (Ni)	49
1.1.32. Indicadores biológicos de calidad de los suelos	49
1.1.33. Salud del suelo	49
1.1.34. Degradación del suelo	50
1.1.35. Degradación física del suelo	50
1.1.36. Degradación química de suelos	50
1.1.37. Degradación biológica de los suelos	51
1.1.38. Agricultura convencional	51
1.1.39. Agroecología	52
1.1.40. Modelos agroecológicos y su importancia	53
1.1.41. Los Sistemas Agroforestales (SAF) y su importancia para la sostenibilidad de los agroecosistemas	55
1.1.42. Características de los SAF	56
1.2. Antecedentes	58
Capítulo II	65
Metodología	67
2.1. Descripción de área de estudio	67
2.2. Tipo de investigación	69
2.3. Población de estudio	69
2.4. Muestra	69
2.5. Selección de los modelos agroecológicos	71
2.6. Diseño e implementación de los modelos agroecológicos ...	73
2.7. Preparación del suelo, siembra y fertilización de los tres modelos	74

2.8.	Preparación de suelos	74
2.9.	Siembra	74
2.10.	Fertilización	75
2.11.	Manejo de plagas y enfermedades	75
2.12.	Caracterización taxonómica de los suelos	77
2.13.	Caracterización fisicoquímica de los suelos	81
2.14.	Caracterización de la macrofauna del suelo	82
2.15.	Caracterización de la mesofauna del suelo	86
2.16.	Caracterización de la microfauna del suelo	89
2.17.	Obtención de Nematodos	89
2.18.	Obtención de Protozoarios	90
2.19.	Obtención de Turbelarios y Rotíferos	91
2.20.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre las variables químicas y biológicas del suelo	91
2.21.	Análisis estadístico	91

Capítulo III

Resultados y Análisis

3.1.	Caracterización de los suelos	95
3.1.1	Clasificación taxonómica de los suelos	96
3.1.1.1	Perfil de suelo de la finca El Zancudo	96
3.1.1.2	Perfil de suelo de la finca El Caimito	98
3.1.1.3	Perfil de suelo finca El Porvenir	99
3.1.1.4	Perfil de suelo finca Villa Ángel	101
3.1.1.5	Perfil de suelo finca La Estrella	102
3.1.1.6	Perfil de suelo finca San Jacinto	103
3.2.	Caracterización química de los suelos	106
3.3.	Conclusiones parciales	121
3.4.	Caracterización biológica de los suelos	122
3.5.	Composición de la fauna asociada al suelo	128
3.6.	Abundancia, riqueza específica e índices de diversidad, equidad, dominancia para la macrofauna de los suelos	130
3.7.	Abundancia, riqueza específica e índices de diversidad, equidad y dominancia para la mesofauna de los suelos	133
3.8.	Abundancia, riqueza específica e índices de diversidad, equidad y dominancia para la microfauna de los suelos	135

3.9.	Conclusiones parciales	137
3.10.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre las variables químicas del suelo	137
3.11.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la abundancia de especies de la macrofauna del suelo	157
3.12.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la riqueza específica de especies (S) de la macrofauna del suelo	158
3.13.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre los índices de biodiversidad de la macrofauna del suelo por modelo agroecológico	159
3.14.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la abundancia de especies de la mesofauna del suelo por finca	160
3.15.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la riqueza específica de especies (S) de la mesofauna del suelo por finca	161
3.16.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre los índices de biodiversidad de la mesofauna del suelo por modelo agroecológico	162
3.17.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la abundancia de especies de la microfauna del suelo por finca	162
3.18.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la riqueza específica de especies (S) de la microfauna del suelo por fincas	163
3.19.	Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre los índices de biodiversidad de la microfauna del suelo por modelo agroecológico	164
	Conclusiones Generales	167
	Recomendaciones	169
	Referencias	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa político e información administrativa de Norte de Santander	68
Figura 2.	Mapa de ubicación del municipio Ocaña, Norte de Santander	78
Figura 3.	Ubicación de las 15 fincas participantes del proyecto en el municipio Ocaña, Norte de Santander	83
Figura 4.	Recolección de la macrofauna del suelo	84
Figura 5.	Identificación de la macrofauna del suelo	85
Figura 6.	a) Búsqueda de macrofauna b) Etiquetas papel apergaminado en frasco tipo rosca con alcohol al 70% e información de georreferenciación de la recolecta	87
Figura 7.	Recolección de la mesofauna del suelo	88
Figura 8.	Recolección de los nemátodos del suelo	90
Figura 9.	a) Muestra de monolito para mesofauna b) Montaje embudo de Berlesse.	128
Figura 10.	a) Tamices de 350 μm , 250 μm y 100 μm . b) Colecta de nematodos en cajas de Petri para su identificación	132
Figura 11.	Análisis de conglomerados para la fauna del suelo en las 15 fincas del municipio de Ocaña, Norte de Santander	134
Figura 12.	Análisis de conglomerados de para la macrofauna del suelo	136
Figura 13.	Análisis de conglomerados para la mesofauna del suelo	157
Figura 14.	Análisis de conglomerados para la microfauna del suelo	158
Figura 15.	Abundancia de especies (N) de la macrofauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander	160
Figura 16.	Riqueza específica de especies (S) de la macrofauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander	161
Figura 17.	Abundancia de especies (N) de la mesofauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander	163

Figura 18. Riqueza específica de especies (N) de la mesofauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander 164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Descripción de las fincas y los modelos agroecológicos propuestos y los seleccionados	73
Tabla 2.	Descripción de los modelos agroecológicos	76
Tabla 3.	Fincas seleccionadas para la caracterización taxonómica de los suelos en cada modelo agroecológico en el municipio Ocaña, Norte de Santander	77
Tabla 4.	Formulario de descripción de suelos del IGAC	79
Tabla 5.	Formulario para la descripción de los horizontes	80
Tabla 6.	Distribución de los modelos agroecológicos y perfiles de suelos de las fincas	82
Tabla 7.	Descripción del perfil de suelo en la finca El Zancudo	95
Tabla 8.	Descripción del perfil de suelo ubicado en la finca El Caimito	97
Tabla 9.	Descripción del perfil de suelo ubicado en la finca El Porvenir	98
Tabla 10.	Descripción del perfil de suelo ubicado en la finca Villa Ángel	100
Tabla 11.	Descripción del perfil de suelo ubicado en la finca La Estrella	101
Tabla 12.	Descripción del perfil de suelo ubicado en la finca San Jacinto	102
Tabla 13.	Porcentaje de las fincas con valores de nutrientes catalogados como deficiente y bajos	104
Tabla 14.	Porcentaje de las fincas con valores de pH, conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico, saturación de humedad y capacidad de intercambio catiónico (CIC) que han sido catalogados de deficiente y bajo	106
Tabla 15.	Comparación de medias de las variables físicas y químicas de los suelos entre la parcela testigo y la agroecológica en las 15 fincas estudiadas	107
Tabla 16.	Comparación de medias de las concentraciones de macroelementos en suelos entre la parcela testigo y la agroecológica en las diferentes fincas estudiadas en el municipio Ocaña	107
Tabla 17.	Comparación de medias de la concentración de microelementos y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) entre las parcelas agroecológica y testigo en las 15 fincas del municipio Ocaña, Norte de Santander	108
Tabla 18.	Análisis de la varianza para la comparación de los elementos químicos en los suelos bajo los diferentes modelos agroecológicos implementados en el municipio Ocaña, Norte de Santander	111
Tabla 19.	Análisis de la varianza para la comparación de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos bajo los tres modelos agroecológicos implementados en el municipio Ocaña, Norte de Santander	112

Tabla 20.	Análisis de la varianza para la comparación de algunos elementos químicos de los suelos en la interacción finca x modelo agroecológico en el municipio Ocaña, Norte de Santander	113
Tabla 21.	Análisis de la varianza para la comparación de algunas variables físicas y elementos químicos de los suelos en la interacción finca x modelo agroecológico en el municipio Ocaña, Norte de Santander	115
Tabla 22.	Biología del suelo para el modelo agroecológico Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P)	116
Tabla 23.	Biología del suelo para el modelo agroecológico Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)	117
Tabla 24.	Biología del suelo del modelo agroecológico 3 Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)	119
Tabla 25.	Abundancia, riqueza específica, diversidad, equidad y dominancia para la macrofauna de los suelos	123
Tabla 26.	Abundancia, riqueza específica, diversidad, equidad y dominancia para la mesofauna de los suelos	125
Tabla 27.	Abundancia, riqueza específica e índices de diversidad, equidad y dominancia para la microfauna de los suelos	126
Tabla 28.	Estadísticos descriptivos de las variables químicas en las 30 parcelas del Modelo Nogal Cafetero-Cacao- Plátano (NC-C-P)	131
Tabla 29.	Estadísticos descriptivos de las variables químicas del suelo para las parcelas agroecológica y testigo del Modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P)	133
Tabla 30.	Comparación las variables químicas del suelo entre la parcela agroecológica y el testigo para para el modelo Nogal Cafetero-Cacao- Plátano (NC-C-P)	135
Tabla 31.	Estadísticos descriptivos de las variables químicas de los suelos para las 30 parcelas del Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)	138
Tabla 32.	Estadísticos descriptivos de las variables químicas del suelo para las parcelas agroecológica y testigo del Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz CN-A-M	139
Tabla 33.	Comparación las variables químicas del suelo entre la parcela agroecológica y el testigo para para el modelo 1 Nogal Cafetero-Aguacate- Maíz	141
Tabla 34.	Estadísticos descriptivos de las variables para las 30 parcelas del Modelo 3 Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)	142
Tabla 35.	Estadísticos descriptivos de las variables químicas del suelo para las parcelas agroecológica y testigo del Modelo 3 Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)	143
Tabla 36.	Comparación las variables químicas del suelo entre la parcela agroecológica y el testigo para para el modelo 3 Nogal Cafetero-Aguacate- Frijol (NC-A-F)	146

Tabla 37.	Comparación de las variables químicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela agroecológica en el modelo 1 Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)	147
Tabla 38.	Comparación de las variables químicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela testigo del modelo 1 Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)	148
Tabla 39.	Comparación de las variables químicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela agroecológica del modelo 2 Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P)	150
Tabla 40.	Comparación de las variables químicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela testigo del modelo 2 Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P)	151
Tabla 41.	Comparación de las variables químicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela agroecológica del modelo 3 Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)	152
Tabla 42.	Comparación de las variables químicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela testigo del modelo 3 Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)	153
Tabla 43.	Índices de biodiversidad de la macrofauna del suelo por modelo 1 Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M) en el municipio de Ocaña, Norte de Santander	154
Tabla 44.	Índices de biodiversidad global de la mesofauna del suelo por modelo agroecológico en el municipio de Ocaña, Norte de Santander	155
Tabla 45.	Índices de biodiversidad global de la microfauna del suelo en el modelo 1 Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz en el municipio de Ocaña, Norte de Santander	156
Tabla 46.	Índices de biodiversidad de la macrofauna del suelo para el modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M) en el municipio de Ocaña, Norte de Santander	159
Tabla 47.	Índices de biodiversidad global de la mesofauna del suelo por modelo agroecológico en el municipio de Ocaña, Norte de Santander	162
Tabla 48.	Índices de biodiversidad global de la microfauna del suelo en el modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz en el municipio de Ocaña, Norte de Santander	165

PRÓLOGO

Es bien conocido que el modelo de agricultura convencional implementado con el objetivo fundamental de obtener altos rendimientos ha estado basado en el uso de insumos sintéticos, como pesticidas, fertilizantes industriales, antibióticos, entre otros; así como el riego, que han tenido impactos negativos en el medio ambiente. Una forma de ‘paliar’ estos impactos sería a través de la concientización sobre las causas y las consecuencias en el corto y largo plazo, así como de la necesidad de diseñar modelos de gestión de los recursos que tomen en cuenta la sostenibilidad y las regulaciones ambientales correspondientes. Es importante que los agricultores, investigadores agrícolas y demás actores de los procesos productivos utilicen nuevas y mejores herramientas para enriquecer y promover una relación más sostenible con la naturaleza. No obstante, esto podría plantear diferentes corrientes conceptuales, es decir, dos tipos de relaciones a la naturaleza: por un lado estaría la consideración del progreso tecnológico como la forma de abordar los problemas ambientales, y por el otro aquella corriente que apunta a una mejor protección o restauración del capital natural para aumentar los servicios ecosistémicos.

Es aquí donde aparece la agroecología como un paraguas demasiado amplio para cubrir la gran variedad de acciones a nivel de campo y de la investigación, todas dirigidas a disminuir el daño ambiental relacionado con la actividad agrícola o a aumentar la ecologización de los sistemas productivos, para lo cual todos los actores requieren de nuevas herramientas.

La agroecología puede estar conceptualizada desde diferentes puntos de vista. Puede ser referenciada como un movimiento que defiende a los agricultores y las comunidades rurales, las cadenas alimentarias locales, la diversidad de semillas y razas y la calidad de los alimentos. También puede entenderse como un enfoque de los sistemas agrícolas y alimentarios que integra los principios ecológicos y métodos biológicos de los sistemas tradicionales para el diseño y el manejo de una agricultura sostenible. Por otro lado, la agroecología como una ciencia concede prioridad a la investigación, los enfoques

participativos y la transdisciplinariedad, los cuales incluyen el estudio de los sistemas alimentarios completos abarcando las dimensiones ecológica, económica y social, así como los principios para el diseño y gestión de una agricultura sostenible. Es por ello que, las diferentes formas de producción agroecológica tienden a generar conocimiento local, a la vez que promueven la identidad y la cultura de los territorios rurales.

En el marco de las presiones por la creciente demanda de alimentos y la disminución de la oferta de servicios ecosistémicos, el uso y gestión sostenibles inmersos en los sistemas agroecológicos se convierten en una prioridad de investigación. Estos sistemas agroecológicos son concebidos como ecosistemas manipulados por modificaciones antropogénicas, basados en la diversidad de especies en los que las plantas, los animales vertebrados e invertebrados y las comunidades microbianas cohabitan con usos agrícolas en el contexto de los suelos, además de proporcionar servicios ecosistémicos. Por su parte, los modelos agroecológicos son representaciones de sistemas agroecológicos que brindan una perspectiva integrada en la que los elementos bióticos interactúan dinámicamente con el suelo, el clima y los factores de manejo.

Bajo esta óptica, conociendo que el principal eje de desarrollo económico en el departamento Norte de Santander y particularmente el municipio de Ocaña, es el sector agropecuario; el grupo de investigación de la Universidad de Pamplona decidió unir esfuerzos con diferentes actores para diseñar e implementar modelos técnicos con enfoque agroecológico en esa zona de estudio.

Siguiendo las pautas de la investigación participativa y utilizando herramientas de evaluación de gestión, seleccionaron los modelos agroecológicos idóneos para la zona de estudio, tomando en cuenta que para los agricultores, la transición hacia estos modelos implica rediseñar tanto su sistema de producción como el de comercialización. En este sentido, se plantearon como objetivo evaluar la influencia de tres modelos agroecológicos sobre la calidad de los suelos: i) Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M), ii) Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P) y iii) Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F), en cuya implementación participaron 15 familias asentadas en las parcelas objetos de estudio.

Los suelos de las parcelas fueron debidamente clasificados taxonómicamente y caracterizados desde el punto de vista físico, químico y biológico, antes y después de la implementación de los modelos agroecológicos.

Es importante destacar que en términos generales, los modelos agroecológicos impactaron positivamente en los suelos de las parcelas, destacándose Nogal Cafetero-Cacao-Plátano y Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol.

Como persona ligada a la docencia, investigación y extensión en el área de la Ciencia del Suelo, considero que en este libro se recoge una experiencia que merece un reconocimiento por diversas razones: los esfuerzos puestos para el logro de los objetivos, la concepción e implementación de la investigación participativa, la generación de conocimientos y experiencias compartidas, la rigurosidad de los planteamientos y los resultados obtenidos durante el proceso.

Después de leer el contenido de este libro me queda claro que es posible la implementación de modelos agroecológicos de manera interdisciplinaria, así como trabajar para y con los agricultores con un fin común.

Mi mayor reconocimiento para el grupo de trabajo y todos quienes apoyaron esta investigación, “aprendemos de lo que hacemos”. Espero que este trabajo sea un escalón para seguir avanzando.

Prof. Dr. Deyanira Lobo Luján

SÍNTESIS

El suelo provee importantes funciones ambientales, entre ellas destacan el aporte de nutrientes para las plantas, hábitat de diversos organismos que transforman la materia orgánica presente en él, entre otros factores que lo hacen ser esencial en el desarrollo de los ecosistemas de los cuales forma parte. El uso incontrolado e intensivo de pesticidas e insecticidas en las actividades agrícolas y ganaderas está conduciendo a la degradación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos hasta el punto de causar pérdida de su calidad. El principal eje de desarrollo económico en el departamento Norte de Santander es el sector agropecuario, el cual corresponde a cultivos permanentes y de ciclo corto. Por su parte, el municipio de Ocaña cuenta con un potencial económico en cultivos promisorios y con características agroecológicas que permiten diseñar modelos técnicos para el sostenimiento ecológico en las zonas de estudio. En tal sentido, el objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de tres modelos agroecológicos sobre la calidad del suelo en ocho veredas del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Con base en la información proporcionada por la Gobernación del Departamento de Norte de Santander (2016) a través de la Secretaría de Desarrollo Económico, se identificaron y seleccionaron las familias participantes teniendo en cuenta criterios tales como: vocación agrícola, superficie mínima de tres hectáreas de tierra, estar de acuerdo en designar por lo menos dos hectáreas para el desarrollo del proyecto, estar tipificado como pequeño productor agrícola según el Decreto 780 de 2011 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, comprometerse a participar en el proyecto y saber leer y escribir.

Se seleccionó una muestra conformada por 15 familias. Dentro del proceso de investigación se desarrollaron los modelos agroecológicos adecuados a las condiciones agroclimáticas intrínsecas de la zona. El enfoque del proyecto fue participativo y su alcance comprendió la valoración de los cultivos implementados en el territorio, la validación de modelos agroecológicos para producción de cultivos promisorios en condiciones de un desarrollo sostenible y la identificación de la cadena

de valor para los productos dispuestos en el modelo. Luego del consenso con los agricultores se seleccionaron los siguientes modelos agroecológicos: Nogal Cafetero - Aguacate-Maíz (NC-A-M), Nogal Cafetero - Cacao -Plátano (NC-C-P), Nogal Cafetero - Aguacate - Frijol (NC-A-F). Se realizó un levantamiento cartográfico de las fincas a través de imágenes hiper espectrales, haciendo uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT), los cuales registraron las imágenes a una altura de 100 metros aproximadamente, en general, a cada finca. Se realizó la caracterización taxonómica de los suelos en seis de las 15 fincas participantes en el proyecto, las cuales fueron separadas según el modelo agroecológico establecido. Adicionalmente se hizo la caracterización edafológica y biológica de los suelos en cada una de las 15 fincas participantes del proyecto en el municipio de Ocaña. Se procedió a realizar la validación de los modelos agroecológicos desde el punto de vista ambiental y agronómico y evaluar la influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre las variables químicas y biológicas del suelo. Como resultados se encontró que en el municipio de Ocaña, se identificaron dos tipos de paisaje: montaña y lomerío, en un ambiente denudacional con áreas susceptibles a fenómenos de erosión como remociones en masa, dando como resultado suelos de los órdenes Entisol e Inceptisol con presencia o no de fragmentos de roca superficial y/o en profundidad, fertilidad natural baja y diferentes grupos texturales. Los grupos de similitud conformados en la macro, meso y microfauna del suelo puede ser atribuido a la variación de la humedad aparente en la zona, diferenciando las más secas de aquellas con una mayor humedad en suelo asociada a la baja pendiente que facilita la retención de agua, promoviendo un mejor microclima para la preservación de especies que contribuyen al ciclaje de nutrientes. La macro, meso y microfauna del suelo varió en cada finca y en cada modelo agroecológico, sin embargo, el orden que tuvo mayor representatividad fue Hymenoptera; en relación con la meso y microfauna presentaron una menor riqueza y abundancia de especies. Como conclusión se puede decir que los modelos implementados impactaron poco sobre los elementos químicos del suelo entre la parcela agroecológica y la testigo con excepción del pH y la CE que disminuyeron al año de establecidos los cultivos. También el establecimiento de los modelos aumentó la materia orgánica del suelo al año de establecidos los cultivos. Por último, los modelos agroecológicos impactaron posi-

tivamente en las fincas por su propia concepción de sistema agroforestal, el acompañamiento de las TICs y las técnicas de agricultura de precisión; no obstante algunos modelos fueron más exitosos que otros bajo cada condición edafoclimática sobre todo desde el punto de vista de la población lograda, el desarrollo de las plantaciones y la producción de cosecha inminente, destacándose en el municipio de Ocaña el Nogal Cafetero-Cacao-Plátano y Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol.

INTRODUCCIÓN

Los modelos agroecológicos son sistemas biodiversos que integran aspectos prácticos, científicos y sociales cuyo objetivo es reducir la utilización de insumos externos y a su vez, proveer de múltiples servicios ecosistémicos a través de prácticas de gestión basadas en principios ecológicos que permitan mejorar la calidad del suelo y la productividad de los cultivos y además, encontrar soluciones a los desafíos agrícolas en un contexto local (McCune et al., 2017; Nicholls y Altieri, 2017; Palomo-Campesino et al., 2018; FAO, 2019). En un agroecosistema, la transición hacia sistemas más sostenibles está basada en la diversidad de plantas, las cuales pueden mejorar las funciones reguladoras del suelo y la provisión de otros servicios ecosistémicos (Ezeaku, 2015). Una mayor cobertura vegetal crea condiciones favorables para el desarrollo de los organismos del suelo al regular la temperatura del aire, la humedad del suelo y el ciclo de nutrientes (Álvarez-Sánchez et al., 2021; Mancini et al., 2021).

Existe evidencia científica que sugiere que los sistemas agroecológicos son un hábitat para la biodiversidad, ofrecen seguridad alimentaria, mejoran calidad del suelo y son más resilientes ante perturbaciones externas (De Benedetto et al., 2017; Garibaldi et al., 2017; Chavarria et al., 2018; Zhou et al., 2022). Sin embargo, el efecto del tipo de manejo y la diversidad vegetal sobre la calidad del suelo y la productividad de los cultivos es aún poco estudiada (Álvarez-Sánchez et al., 2021; Mancini et al., 2021).

La caracterización de la calidad del suelo debe basarse en un conjunto de variables que capturen la complejidad de los agroecosistemas en escenarios de manejo realistas (FAO, 2019). El manejo puede tener un efecto directo y/o indirecto sobre la biodiversidad y el funcionamiento del suelo, y consiste en prácticas combinadas que se aplican para diferentes propósitos (Jezeer et al., 2018; Rahn et al., 2018). Por ejemplo, un modelo de producción agroecológica puede tener múltiples propósitos, a saber: implementación de árboles nativos y frutales en campos agrícolas. En este caso, los árboles contribuirían a ofrecer diferentes funciones y servicios ecosistémicos como lo son el ciclaje de nutrien-

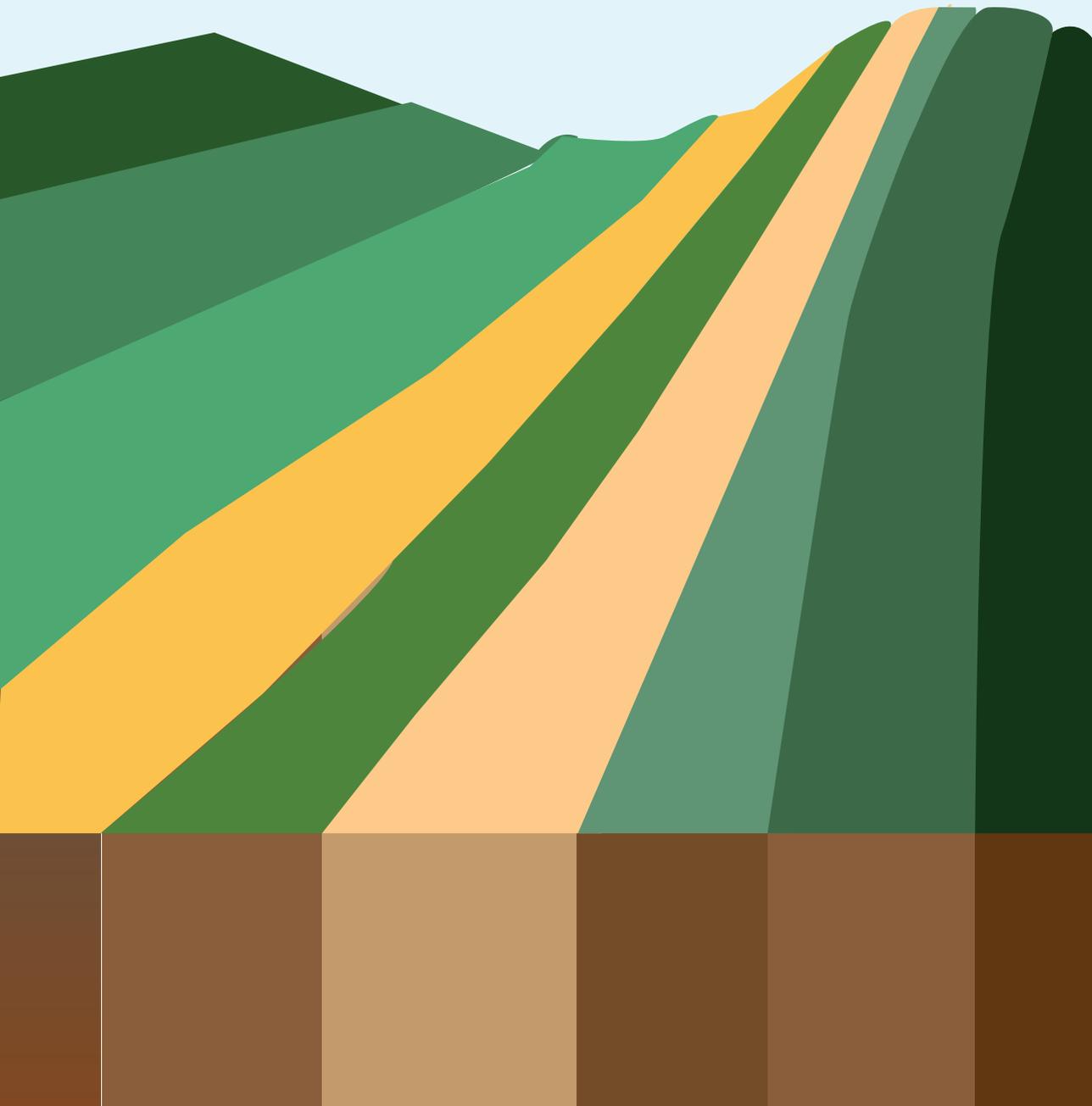
tes, la regulación de la temperatura, el suministro de madera y frutos, el almacenamiento de carbono y el control de plagas (FAO, 2019). Así mismo, la variabilidad estructural, en términos de altura de la vegetación, puede influir en la eficiencia para capturar agua, carbono y luz y, a su vez, en el funcionamiento del agroecosistema (Ali et al., 2016).

La calidad del suelo está influenciada por el tipo de manejo dado así como por la interacción de factores químicos, físicos y biológicos del suelo (FAO, 2019). Los indicadores biológicos representados por la fauna del suelo son muy sensibles a los cambios y juegan un papel central en el funcionamiento de los agroecosistemas. Por lo tanto, su estudio puede ayudar a comprender mejor las respuestas del suelo a la biodiversidad y el manejo de la superficie, así como la relación entre la biología, la química y la física del suelo (Mancini et al., 2021). Es así como la evaluación de la influencia de tres modelos agroecológicos sobre la calidad del suelo en el municipio de Ocaña, Norte de Santander, puede servir de guía para el desarrollo de agroecosistemas más sostenibles.

Este libro está estructurado en varios capítulos. El primer capítulo presenta una mirada hacia la calidad del suelo, la agroecología, los modelos agroecológicos y los sistemas agroforestales (SAF) y su importancia para la sostenibilidad de los agroecosistemas. En el segundo capítulo se describe la metodología para la selección y delimitación del área de estudio, identificación de los criterios de selección de la población objeto y la muestra poblacional, georreferenciación de las fincas, sensibilización de la población, socialización de los modelos y ajuste participativo de los modelos agroecológicos con los agricultores, caracterización taxonómica y química de los suelos y la caracterización de la macrofauna, mesofauna y microfauna. El capítulo tres, corresponde al análisis e interpretación de los resultados obtenidos en cada una de las variables de suelo analizadas. Finalmente se concluye en función de los aspectos más relevantes encontrados en esta investigación.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO



MARCO TEÓRICO

1.1. Una mirada hacia la calidad del suelo

El término suelo se deriva del latín *solum* y significa piso; puede definirse como la capa superior de la corteza terrestre que se distingue de la roca sólida y en donde las plantas crecen. Está formado por tres fases: sólida, líquida y gaseosa, proporciona soporte mecánico y a su vez sirve de sustento para las plantas. El suelo es un componente esencial del ambiente en el que se desarrolla la vida; es vulnerable, de difícil y larga recuperación (tarda desde miles a cientos de miles de años en formarse) y de extensión limitada, por lo que se considera un recurso natural no renovable (Porta et al., 2003; Silva & Correa, 2009). Desde el punto de vista agrícola es el principal medio de producción, por lo tanto, la capacidad productiva de éste depende de las características físicas, químicas y biológicas propias de cada suelo.

El suelo provee importantes funciones ambientales, entre ellas destacan el aporte de nutrientes para las plantas, almacén de nutrientes y materia orgánica proveniente de restos animales y vegetales, es el hábitat de diversos organismos que transforman esa materia orgánica presente en él, entre otros factores que lo hacen ser esencial en el desarrollo de los ecosistemas de los cuales forma parte (Silva & Correa, 2009; Estrella & González, 2014; Faucon et al., 2017).

El suelo ha sido utilizado por el hombre desde tiempos remotos. En gran parte de las actividades humanas se utiliza el suelo, bien sea para la producción de alimentos mediante la agricultura y la ganadería, extracción de madera de los bosques, el asentamiento de ciudades, el desarrollo industrial, la extracción de minerales, entre otros (Estrella & González, 2014; Silva & Correa, 2009).

A pesar de su importancia, el suelo no ha recibido la atención que merece. El uso inadecuado de este importante recurso está conduciendo

do a su contaminación y consecuente degradación. La contaminación del suelo es una de las principales formas de desastre ambiental que enfrenta nuestro planeta en la actualidad (Manahan, 2000). Ésta se asocia con la entrada de sustancias que, a partir de una cierta concentración deben considerarse como no deseables (Porta et al., 2003). La contaminación del suelo conlleva a la degradación de las propiedades físicas, químicas y biológicas que, a su vez, afecta negativamente las plantas, animales y humanos (López & Delgado, 1996).

Se entiende por degradación al descenso en la calidad del suelo y su habilidad para cumplir sus funciones como medio para el crecimiento de las plantas, como regulador del régimen hídrico y como filtro ambiental. La degradación puede ser debida a causas naturales o inducidas por el hombre (López & Delgado, 1996). Los cambios desfavorables en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo provocan efectos negativos en la productividad de las plantas y en la calidad ambiental (Arias, 2001).

El uso incontrolado e intensivo de pesticidas e insecticidas en las actividades agrícolas y ganaderas está conduciendo a la degradación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos hasta el punto de causar la pérdida irrecuperable de éstos (Porta et al., 2003; Silva & Correa, 2009; Rodríguez-Eugenio et al., 2019). Dentro de la degradación de las propiedades físicas asociadas a las actividades agrícolas y pecuarias está la erosión, la cual se produce a causa de la tala y quema de los bosques o como consecuencia del uso de prácticas convencionales de preparación de tierras, donde el suelo queda totalmente expuesto y susceptible de perderse por efecto del agua de lluvia. Otro tipo de degradación de suelos es la compactación producto del paso de maquinaria pesada o por el pisoteo del ganado (López & Delgado, 1996).

La degradación química del suelo puede ser causada por la acidificación, que ocurre cuando se emplean fertilizantes químicos acidificantes como la urea o cuando se aplica agua de riego con pH ácido. Por otro lado, la salinización es otro estado degradado del suelo, caracterizado por un aumento del pH debido al uso de agua de riego con pH elevado (Rodríguez-Eugenio et al., 2019).

Por último, la degradación biológica del suelo, la cual se asocia con una disminución del crecimiento cualitativo y cuantitativo de microorganismos benéficos responsables de los procesos de descomposición

de la materia orgánica de los suelos, reduce el rendimiento de los cultivos, aumenta el riesgo de introducir metales pesados a la cadena trófica y, además, se incrementa la amenaza de contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos (aguas freáticas) mediante procesos de transferencia (Porta et al., 2003). De igual forma, se asocia a la presencia de microorganismos patógenos causantes de enfermedades que dificultan el sano y normal desarrollo de plantas y animales, incluso pueden llegar a representar una amenaza para la salud humana (Galán & Romero, 2008).

1.1.1. Indicadores de calidad de los suelos

La calidad se relaciona con la utilidad del suelo para un propósito particular en una escala de tiempo relativamente amplia (Herrera et al., 2017). Para Gregorich et al. (1994) la calidad de suelo es una medida de su capacidad para funcionar adecuadamente con relación a un uso específico. Arshad & Coen (1992) le dieron a este concepto una connotación más ecológica; la definieron como su capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, preservando un ambiente sano.

Las definiciones más recientes de calidad del suelo se basan en la multifuncionalidad del suelo y no sólo en un uso específico, pero este concepto continúa evolucionando (Singer & Ewing, 2000). Estas definiciones fueron sintetizadas por el Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat (Karlen et al., 1997).

El término calidad del suelo se empezó a acotar al reconocer las funciones del suelo, a saber: promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible); atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental) y; favorecer la salud de plantas, animales y humanos (Bünemann et al., 2018).

La calidad del suelo puede ser medida a través de indicadores. Para Burns et al. (2006); Benedetti & Dilly (2006) y Obade et al. (2016), los indicadores de la calidad del suelo deben describir los procesos del

ecosistema, integrar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reflejar los atributos de sostenibilidad a medir, ser sensibles a las variaciones del clima y manejo, ser versátiles, es decir, aplicables a las condiciones de campo y accesibles a muchos usuarios, reproducibles, fáciles de interpretar, sensibles a los cambios en el suelo por efecto de la intervención antrópica, formar parte de una base de datos del suelo y tener pertinencia y representatividad.

De acuerdo con la FAO (2018), la calidad del suelo es definida como la capacidad específica que tiene un suelo para funcionar en un ecosistema natural o antrópico de acuerdo con las siguientes funciones: (1) promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible); (2) atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); (3) favorecer la salud de plantas, animales y humanos. Por otro lado, la salud del suelo está relacionada con la capacidad de los suelos de mantener una diversa comunidad de organismos que ayuden a controlar las enfermedades de las plantas, los insectos y las malas hierbas, forman asociaciones simbióticas beneficiosas con las raíces de las plantas, reciclan los nutrientes vegetales esenciales. En tal sentido, los suelos sanos mejoran su estructura o agregación de las partículas minerales y orgánicas con efectos positivos sobre la capacidad de retención de agua y nutrientes, optimizan la producción agrícola, no contaminan su entorno, sino que contribuyen a mitigar el cambio climático conservando o incrementando su contenido de carbono (FAO, 2018; Reeve et al., 2016; Doran y Parkin, 1994).

1.1.2. Indicadores físicos de calidad de los suelos

Las propiedades físicas juegan un papel importante en la selección de suelos adecuados para uso. Estas proveen a las plantas soporte, movimiento, retención y disponibilidad de agua y nutrientes; además determinan la facilidad de penetración de las raíces y el flujo de calor y aire. Las propiedades físicas también influyen en las propiedades químicas y biológicas.

Las propiedades físicas son una parte necesaria en la evaluación de la calidad del suelo. Los indicadores físicos de calidad del suelo son aquellos que reflejan la manera en cómo el suelo acepta, retiene y transmite agua a las plantas, las limitaciones que se pueden encontrar

para el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y además, están relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros. Las propiedades físicas del suelo propuestas como indicadores de su calidad son la textura, estructura, porosidad, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada, entre otras (López & Delgado, 1996; Phogat et al. 2015; Olivares et al., 2020).

1.1.3. Estructura del suelo

La estructura se define como el estado de agregación de las partículas del suelo (arena, limo y sobre todo arcilla) formando estructuras secundarias o agregados, gracias a la acción de mecanismos como las fuerzas electrostáticas, agentes cementantes como el humus y los óxidos de hierro, etc. La estructura de un suelo puede ejercer influencia sobre el desarrollo radical, equilibrio agua/aire, disponibilidad de nutrientes, etc. (McCarty et al., 2016).

1.1.4. Estabilidad de los agregados del suelo

La estabilidad de los agregados es definida como la resistencia que presentan los agregados de suelo a ser destruidos cuando se ven sometidos a factores ambientales como [,] por ejemplo, la acción del agua (Dahlgren et al., 2008). La estabilidad de los agregados del suelo es considerada un indicador clave de la calidad del suelo porque afecta la susceptibilidad a la erosión, el movimiento del agua y el crecimiento de las raíces de las plantas. La estabilidad de los agregados es un indicador del contenido de materia orgánica, la actividad biológica y el ciclo de nutrientes en el suelo y factores como la labranza, la textura, el estrés mecánico y los sesquióxidos pueden desempeñar un papel importante en la estabilidad de los agregados de los suelos cultivables (Siddique et al., 2017).

1.1.5. Infiltración de agua en el suelo

La infiltración del suelo se refiere a la capacidad del suelo para per-

mitir que el agua entre y atravesase el perfil del suelo. La infiltración permite que el suelo almacene agua temporalmente, haciéndola disponible para el uso de las plantas y organismos del suelo. La tasa de infiltración es una medida de qué tan rápido el agua ingresa al suelo, típicamente expresada en cm o mm por hora, o en m por segundo. Si la tasa de infiltración es demasiado lenta, puede provocar encharcamiento en áreas niveladas, escorrentía superficial y erosión en áreas inclinadas y puede provocar inundaciones o humedad inadecuada para la producción de cultivos. El agua que se infiltra a través de los suelos porosos recarga los acuíferos subterráneos y ayuda a mantener el flujo base en los arroyos. Una alta tasa de infiltración puede provocar la lixiviación de nitrógeno en forma de nitrato o pesticidas y la pérdida de fósforo de los suelos con un alto nivel de este elemento. Las prácticas de manejo que mejoran el contenido de materia orgánica del suelo, la agregación del suelo y la porosidad, tales como el uso de sistemas de cultivo sin labranza y el uso de cultivos con alto contenido de residuos y cultivos de cobertura, pueden mejorar la infiltración del suelo (Pan et al., 2018; USDA, 2014).

La textura del suelo expresada como los porcentajes de arena, limo y arcilla es uno de los principales factores que afectan la infiltración. En suelos arenosos donde predominan los poros más grandes el agua se mueve más rápidamente mientras que en suelos arcillosos, dominados por microporos el agua se mueve más lentamente (USDA, 2014).

1.1.6. Color del suelo

El color del suelo se utiliza para inferir acerca de procesos pedogénicos en los suelos. Los principales agentes responsables del color de los suelos son la materia orgánica, el hierro y, en menor medida, el manganeso. El color del suelo representa una medida indirecta de ciertas propiedades del suelo como la fertilidad o estado de desarrollo o evolución. Se usa para distinguir las secuencias en un perfil del suelo, determinar el origen de material parental, presencia de materia orgánica, estado de drenaje, y la presencia de sales y carbonato (Owens & Rutledge, 2005).

1.1.7. Densidad aparente del suelo

La densidad aparente es la masa de suelo contenida en un determinado volumen cuando se ha extraído toda el agua del suelo. Incluye el espacio poroso y el material sólido, tanto mineral como orgánico. La densidad aparente refleja la porosidad, grado de aireación y capacidad de infiltración, lo que condiciona la circulación de agua y aire en el suelo, los procesos de establecimiento de las plantas (emergencia, enraizamiento) y el manejo del suelo. Esta variable es utilizada como un indicador de calidad del suelo, ya que permite determinar alteraciones producidas por las actividades antrópicas, como el uso de maquinaria pesada, cultivos, pisoteo del ganado, etc., pudiendo indicar el grado de compactación del suelo y las limitaciones para el crecimiento de las raíces (Bache et al., 2008). Debido a la facilidad con la cual se puede medir esta propiedad, se ha utilizado como parámetro para estimar el grado de deterioro del suelo, teniendo en cuenta que a medida que aumenta su valor, se está produciendo una degradación de la estructura de este, bien sea por compactación o por pérdida de materia orgánica.

1.1.8. Porosidad del suelo

La porosidad del suelo se refiere a la cantidad de espacio poroso en el suelo. Es una medida del tamaño y el número de huecos de aire cuyos cambios indican daños estructurales. Es una característica íntimamente ligada con la densidad aparente, con la capacidad de aireación y con la capacidad de retención de humedad del suelo. La porosidad depende entre otros factores de la textura, de la estructura, contenido de materia orgánica, del laboreo, etc. (Brady & Weil, 2002). Los suelos con mayor porosidad tienen más espacio poroso y una mayor tasa de infiltración que aquellos con menor porosidad, en términos generales.

1.1.9. Contenido de agua del suelo

El agua del suelo es el agua químicamente no combinada contenida en los poros del suelo y adsorbida en las partículas del suelo. El agua contenida en el suelo se expresa como porcentaje del peso seco del

suelo (secado al horno a 105 °C) o del volumen total del suelo (Gupta et al., 2008).

1.1.10. Conductividad hidráulica del suelo

La conductividad hidráulica del suelo es definida como la capacidad del agua o de una solución para pasar a través de los poros del suelo en una escala de tiempo particular. La conductividad hidráulica está relacionada con propiedades físicas como la distribución del tamaño de las partículas del suelo, la forma de las partículas del suelo, la porosidad efectiva y la agregación (Rosas et al., 2014). La capacidad hidráulica del suelo se considera como indicador de la salud del suelo ya que además de ser afectada por las condiciones ambientales y del suelo, las diferentes prácticas de manejo también hacen que el estado físico e hidráulico del suelo sea crucial debido a su efecto directo en la determinación del uso del agua y los impactos indirectos a través de la modificación de otras propiedades del suelo por prácticas de labranza en las que la conductividad hidráulica saturada en áreas labradas puede llegar a ser 2,5 veces mayor que las áreas sin labranza debido a la compactación del suelo como consecuencia del tráfico de campo (Çal, & Barik, 2020).

1.1.11. Indicadores químicos de calidad de los suelos

Las propiedades químicas del suelo influyen sobre los sistemas biológicos y su interacción con la fracción mineral de estos. Dentro de las propiedades químicas de los suelos se incluyen la materia inorgánica o fracción mineral, la materia orgánica, las propiedades coloidales de las partículas orgánicas e inorgánicas, la reacción del suelo y la acción amortiguadora en suelos ácidos y suelos básicos. La cantidad de nutrientes en los suelos disponible para las plantas está determinada en buena medida por el contenido de materia orgánica y su porcentaje de humus; siendo este último una importante reserva de nutrientes. De igual forma, la liberación de nutrientes específicos depende del tipo de minerales presente en los suelos, los cuales durante los procesos biogeoquímicos, pueden transformarse en formas disponibles para las plantas, retenerse en el suelo o incluso perderse en el aire o el agua. Por

lo tanto, el suelo almacena, modera la liberación y recicla los nutrientes y otros elementos. De los dieciocho elementos que necesitan las plantas, solo tres, nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), son comúnmente deficientes en los suelos (Reeve et al., 2016).

Los indicadores químicos de calidad del suelo son todas aquellas condiciones químicas que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrimentos para las plantas y los microorganismos. Dentro de los indicadores de la calidad química del suelo se encuentran el pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases, sodio intercambiable, salinidad y la presencia de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos, sustancias radioactivas (Rousseau et al., 2012; Schiefer et al., 2015). Estas variables tienen efectos sobre los sistemas biológicos y su interacción con los minerales [,] así como con la productividad de las plantas y el rendimiento de los cultivos (Rousseau et al., 2012; Schiefer et al., 2015).

1.1.12. pH del suelo

El pH del suelo es una medida de la acidez activa relacionada con la presencia de iones hidrógeno (H^+) o aluminio intercambiable (Al^{+3}). Este es un indicador del grado de acidez o alcalinidad del suelo y es medido en unidades de pH. La escala de pH va de 0 a 14, con un punto neutro a pH7. En este punto neutro la concentración de iones hidrógeno (H^+) es igual a la concentración de iones hidroxilos (OH^-). Los suelos con niveles de pH superiores a 7 se consideran alcalinos; mientras que aquellos con valores de pH menores de 7 son ácidos (Bravo, 2000).

El pH de los suelos es una propiedad fundamental ya que influye en la química y disponibilidad de nutrientes y afecta directamente el crecimiento de las plantas. Los cultivos tienen diferentes requerimientos de pH, probablemente relacionados con la disponibilidad de nutrientes o la susceptibilidad a la toxicidad del aluminio a un pH bajo. Varios problemas pueden causar un crecimiento deficiente de las plantas sensibles a los ácidos en suelos de pH bajo. Por ejemplo, el aluminio y el manganeso son más solubles y pueden ser tóxicos para las

plantas; el calcio, el magnesio, el potasio, el fósforo o el molibdeno (especialmente necesarios para la fijación de nitrógeno por las leguminosas) pueden ser deficientes; y la descomposición de la materia orgánica del suelo se hace más lenta lo que provoca una disminución de la mineralización del nitrógeno (Magdoff & van Es, 2021).

1.1.13. Materia Orgánica del Suelo (MOS)

La Materia Orgánica del Suelo (MOS) es un sistema complejo y heterogéneo representado por la totalidad de sustancias orgánicas del suelo provenientes de restos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, exudados radicales, entradas orgánicas externas (estiércol, compost), etc. Se compone de sustancias como lignina, carbohidratos, proteínas, péptidos, aminoácidos, grasas, ceras y resinas, vitaminas, hormonas, ácidos orgánicos, quelatos, etc., las cuales aportan energía y alimento a los organismos del suelo, al tiempo que son la materia prima para la formación de los coloides orgánicos (humus) que se acumulan en el suelo. La mayoría de los suelos agrícolas productivos tienen entre 3 y 6 % de materia orgánica. La MOS es sumamente importante porque contribuye a la productividad del suelo ya que es la principal fuente de aporte de nutrientes para las plantas (Brady & Weill, 2002).

La MOS en los ecosistemas naturales se encuentra prácticamente en una estabilidad relativa, respecto al ciclo orgánico, en el cual los aportes o entradas (hojarasca y raíces) están en equilibrio con lo mineralizado o extraído (humus). En estos sistemas la MOS se mantiene aproximadamente constante de un año para otro, mientras que en los sistemas agrícolas no existe tal equilibrio. El aporte de materia orgánica es discontinuo y depende de los aportes que haga el ser humano, tales como la aplicación de estiércol, residuos de cosecha, los abonos verdes y las diversas enmiendas orgánicas (cuando se producen) en sustitución de la hojarasca, siendo la descomposición activada por el enterramiento, el laboreo y el aporte simultáneo de abonos minerales (fertilizantes minerales) (Ismail-Meyer et al., 2018).

La materia orgánica afecta las propiedades físicas y químicas del suelo y tiene efectos profundos en el crecimiento y rendimiento de las plantas. La aplicación de materia orgánica, las rotaciones de cultivos y

el uso de cultivos de cobertura reducen la densidad aparente y aumentan la porosidad, lo que mejora las condiciones del suelo para el crecimiento de las raíces (Seiter & Horwath, 2004).

La materia orgánica es una fuente directa de nutrientes de liberación lenta, conduce a una mejor quelatación de microelementos, ayuda a amortiguar el pH del suelo y aumenta la capacidad de intercambio catiónico y aniónico de los suelos, lo que mejora la disponibilidad de nutrientes para las plantas y reduce el potencial de lixiviación (Reeve et al., 2016). Los problemas causados por la acidez del suelo suelen ser menos severos, y el pH óptimo es más bajo, si el suelo está bien provisto de materia orgánica. La materia orgánica ayuda a que el aluminio sea menos tóxico y, por supuesto, el humus aumenta la CIC del suelo. Además, el pH del suelo no cambiará tan rápidamente en suelos con alto contenido de materia orgánica. La acidificación del suelo es un proceso natural acelerado por los ácidos producidos en el suelo por la mayoría de los fertilizantes nitrogenados. La materia orgánica del suelo ralentiza la acidificación y amortigua el pH del suelo porque retiene firmemente el hidrógeno ácido (Magdoff & van Es, 2021).

1.1.14. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la medida de la capacidad que posee un suelo de absorber iones cargados positivamente y es equivalente a la carga negativa del suelo. El intercambio de iones ocurre sobre las superficies con cargas negativas como los minerales de arcilla, fases inorgánicas amorfas y materia orgánica. La CIC es una propiedad muy importante del suelo ya que define la cantidad de sitios disponibles para almacenar los cationes en el suelo y, por lo tanto, es un indicador indirecto de la capacidad amortiguadora de los suelos, también influye en la estabilidad de la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes, el pH del suelo y la reacción del suelo a los fertilizantes y otros mejoradores (Hazleton & Murphy, 2007). La CIC también permite estimar la capacidad que tiene un suelo de suministrarle algunos nutrientes a las plantas, conociendo el porcentaje de saturación que tienen los nutrientes en el complejo de intercambio del suelo (McBride, 1994).

La CIC en los suelos se debe a la materia orgánica bien humificada (“muy muerta”) y minerales arcillosos. La CIC total en un suelo es la suma de la CIC debida a la materia orgánica y a las arcillas. En suelos de textura fina con arcillas de media a alta CIC, gran parte de la CIC puede deberse a las arcillas. Por el contrario, en suelos francos arenosos con poca arcilla, o en algunos de los suelos de los trópicos que contienen arcillas con baja CIC, la materia orgánica puede representar una fracción importante de la CIC total (Magdoff & van Es, 2021).

1.1.15. Bases o cationes intercambiables

Los minerales de arcilla y los componentes de la materia orgánica del suelo tienen sitios cargados negativamente en sus superficies que absorben y retienen iones cargados positivamente (cationes) por fuerzas electrostáticas. Esta carga eléctrica es fundamental para el suministro de nutrientes a las plantas porque muchos nutrientes existen como cationes (por ejemplo, magnesio, potasio y calcio). En términos generales, los suelos con grandes cantidades de carga negativa son más fértiles porque retienen más cationes (McKenzie et al. 2004); sin embargo, algunos cultivos productivos y pastos se pueden cultivar en suelos con baja CIC.

Los principales iones asociados con la CIC en los suelos son los cationes intercambiables calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), sodio (Na^{+}) y potasio (K^{+}) (Rayment & Higginson, 1992), y generalmente se los denomina cationes básicos; en la mayoría de los casos, la suma de los cationes básicos analizados da una estimación adecuada de la CIC ('CIC por suma de bases'). Sin embargo, a medida que los suelos se vuelven más ácidos, estos cationes son reemplazados por H^{+} , Al^{+3} y Mn^{+2} , y los métodos comunes producirán valores de CIC mucho más altos que los que ocurren en el campo (McKenzie et al. 2004). Esta 'acidez de intercambio' debe incluirse al sumar los cationes básicos y esta medida se denomina CIC efectiva (CICE).

Los suelos con alta CIC no sólo contienen más nutrientes, sino que también pueden amortiguar mejor o evitar cambios rápidos en los niveles de estos nutrientes en la solución del suelo. Los suelos con alto contenido de arcilla, limo o materia orgánica tendrán un valor de CIC de 10 o más y no se necesita remediación. Los suelos arenosos tendrán un valor de CIC entre 1 y 5. Agregar materia orgánica a estos suelos

ayudará a aumentar la CIC.

1.1.16. Porcentaje de Saturación de Bases (PSB)

La saturación de bases (BS) es un parámetro fisicoquímico complejo que aproxima las relaciones entre los cationes básicos y ácidos intercambiables en relación con otras propiedades del suelo y factores externos, como la etapa de meteorización, el origen del material parental, la textura, el contenido de carbono orgánico, clima, vegetación, fertilización, contaminación, etc. Como medida directa, la saturación de bases puede indicar el comportamiento y la disponibilidad de elementos cruciales, siendo entonces un indicador general del estado trófico del suelo, aparentemente mejor que otras características individuales, incluido el valor de pH y, por lo tanto, es un parámetro ampliamente utilizado en la caracterización y clasificación del suelo y como uno de los criterios de diagnóstico esenciales (Kabala & Labaz, 2018).

1.1.17. Nutrientes esenciales para las plantas

El suelo es una fuente importante de los nutrientes que las plantas necesitan para crecer. Un elemento se considera esencial para las plantas cuando la función de este elemento no puede ser reemplazado por otro elemento mineral, cuando forma parte de cualquier molécula o constituyente de la planta, que es en sí mismo esencial para ésta, por ejemplo: el nitrógeno en las proteínas, el magnesio en la clorofila y cuando una planta no puede completar su ciclo de vida en ausencia de tal elemento (Magdoff & van Es, 2021).

Hay 17 elementos considerados esenciales en la nutrición de las plantas, tres de ellos se obtienen de forma natural del CO₂ o del agua del suelo en cantidades relativamente grandes a saber: carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O); y los otros 14 se obtienen de los minerales del suelo, la materia orgánica o la aplicación de fertilizantes. Estos se han clasificado en macro y micronutrientes. El nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) son considerados tres de los nutrientes principales y son conocidos como NPK, los cuales son requeridos en cantidades relativamente grandes. Por su parte, el calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) se ubica entre los macronutrientes secundarios y son requeridos en menor cantidad por las plantas. Las plantas también necesi-

tan pequeñas cantidades de hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), molibdeno (Mo), cobre (Cu), zinc (Zinc), cloro (Cl), níquel (Ni), conocidos como oligoelementos o micronutrientes porque la planta los necesita en pequeñas cantidades (Macdonald et al., 2018).

1.1.18. Nitrógeno (N)

El nitrógeno es un elemento clave en el crecimiento de las plantas y la producción de cultivos. Es un constituyente de los componentes básicos de casi todas las estructuras de las plantas. Es un componente esencial de la clorofila, enzimas, proteínas, etc. Es un nutriente requerido en cantidades bastante altas en comparación con los otros nutrientes esenciales. Estimula el crecimiento de las raíces y el desarrollo de los cultivos, así como la absorción de otros nutrientes. Por lo tanto, las plantas, excepto las leguminosas que fijan N_2 de la atmósfera, suelen responder rápidamente a las aplicaciones de N. Las principales formas de N en el suelo son amonio ($N-NH_4^+$) y nitrato ($N-NO_3^-$) y compuestos orgánicos de N (Hofman & Van Cleemput, 2004).

La mayor parte del N en un suelo superficial está presente como N orgánico. Consiste en proteínas (20 a 40 %), amino azúcares, tales como las hexosaminas (5 - 10 %), derivados de purina y pirimidina ($\leq 1\%$), y compuestos complejos no identificados formados por reacción de $N-NH_4^+$ con lignina, polimerización de quinonas con compuestos de N y condensación de azúcares y aminas. Estas diferentes fracciones de N son susceptibles de varios procesos de transformación. Por otro lado, el N inorgánico en el suelo es solo una pequeña fracción del N total del suelo (Macdonald et al., 2018).

En la mayoría de los ecosistemas, el N se mueve del suelo a la planta y de la planta (residuo) de regreso al suelo a través de la biomasa microbiana. El N sufre muchas transformaciones, todas incluidas en el “ciclo del nitrógeno”. En los ecosistemas naturales, este ciclo está más o menos cerrado, es decir, las entradas de N están en equilibrio con las pérdidas de N. En los ecosistemas agrícolas, sin embargo, este ciclo se ve perturbado por la exportación de cantidades sustanciales de N con los productos cosechados (Hofman & Van Cleemput, 2004).

1.1.19. Fósforo (P)

El fósforo (P) es el segundo macronutriente más importante como elemento esencial en la nutrición vegetal después del nitrógeno. Es un nutriente clave en la producción agrícola y en su ausencia o deficiencia se limita el crecimiento de las plantas en muchos suelos. El fósforo es un componente importante del compuesto orgánico trifosfato de adenosina (ATP), que es la moneda energética que impulsa todos los procesos bioquímicos en las plantas. También es un componente integral de los ácidos nucleicos, coenzimas, nucleótidos, fosfoproteínas, fosfolípidos y fosfatos de azúcar. También participa en procesos como la fotosíntesis, respiración, fijación de nitrógeno, floración, fructificación y maduración. El P en el suelo está presente en varias formas químicas que incluyen el P inorgánico (Pi) y el P orgánico (Po). Estas formas de P difieren en su comportamiento, destino en los suelos y disponibilidad para las plantas (Muindi, 2019).

En sistemas agrícolas el Po proviene principalmente de la descomposición bioquímica de productos vegetales y animales, junto con la microflora y la fauna del suelo. Cuando se aplica formas inorgánicas de P al suelo mediante fertilización química, este se puede convertir a formas orgánicas (inmovilizadas) especialmente en suelos deficientes de P, ya que los microorganismos convierten el Pi en Po al incorporarlo en sus células vivas (Richardson, 1994; Muindi, 2019).

El fósforo inorgánico (Pi) se presenta principalmente como H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} que pueden estar adsorbidos en las superficies de óxidos e hidróxidos de Fe o Al, materia orgánica o unidos al Ca. La adsorción de P en los suelos depende del pH del suelo y de los minerales arcillosos (Olibone & Rosolem, 2010). Sin embargo, la mayor parte del Pi se presenta en la fracción de arcilla como sales de ácido ortofosfórico. El fósforo forma compuestos insolubles con hierro y aluminio a pH bajo, compuestos más solubles con calcio y magnesio a valores de pH cercanos a la neutralidad y compuestos insolubles con calcio a valores de pH más altos (Shen et al., 2011).

1.1.20. Potasio (K)

El potasio es otro de los nutrientes primarios y también el elemento más abundante en los suelos. El potasio es absorbido del suelo en

forma de ión K^+ y como tal se encuentra en la fracción soluble de la célula vegetal. Es un elemento móvil, fácilmente translocable desde las partes viejas a los tejidos meristemáticos jóvenes o en crecimiento. El potasio en las plantas aumenta el vigor y la resistencia a las enfermedades, ayuda a formar y movilizar almidones, azúcares y aceites en las plantas y puede mejorar la calidad de la fruta. El contenido de K^+ en el suelo varía de un lugar a otro en función de las propiedades físicas y químicas del suelo. Las diferentes formas de potasio en el suelo incluyen K^+ soluble en agua, K^+ intercambiable, no intercambiable (fijo), mineral, K^+ reticular y K^+ total. Estas formas no están homogéneamente distribuidas en los suelos y su cantidad depende del material original, el grado de meteorización, las ganancias de K^+ a través de abonos y fertilizantes y las pérdidas debidas a la eliminación de cultivos, la erosión y la lixiviación. Por lo general, las cantidades de K^+ total y no intercambiable presentes en el suelo son altas en comparación con el K^+ intercambiable y soluble en agua. La mayor parte del potasio del suelo (alrededor del 98 % del K^+ total) generalmente existe en forma no disponible en minerales arcillosos primarios (micas y feldespatos) y secundarios (grupo illita). El K^+ disponible y el K^+ intercambiable en general son las formas fácilmente disponibles para las plantas (Lalitha & Dhakshinamoorthy, 2014).

1.1.21. Calcio (Ca)

El calcio es un catión muy abundante en las hojas de las plantas y se comporta como un elemento inmóvil dentro de sus tejidos. El calcio es un componente de la pared celular e interviene en la selectividad que tienen las membranas de las raíces de las plantas en la absorción de iones, le confiere rigidez a las membranas que intervienen en la germinación del grano de polen, participa en el transporte intracelular de nitritos y como cofactor en un buen número de reacciones enzimáticas (White & Broadley, 2003).

El contenido de Ca en los suelos varía entre 0,1 y 0,2 % en la mayoría de los casos. El Ca forma parte de los minerales primarios tales como: feldespatos cálcicos, anfíboles, plagioclasas, piroxenos, augita, hornblenda. Estos minerales a través de la intemperización liberan Ca^{+2} a la solución del suelo el cual puede perderse por drenaje, ser absorbido por microorganismos y plantas, precipitarse bajo la forma de

compuestos secundarios o adsorbido al complejo coloidal del suelo. Las deficiencias de calcio generalmente se asocian con suelos de pH bajo y suelos con una CIC baja. El manejo de las deficiencias de calcio suele ser el encalado y los aportes de materia orgánica al suelo (Magdoff & van Es, 2021).

1.1.22. Magnesio (Mg)

El magnesio participa en la formación de la clorofila y es un elemento esencial en la estructura del cloroplasto vital para la fotosíntesis. Las deficiencias ocurren principalmente en suelos ácidos arenosos en áreas de alta precipitación. Las aplicaciones intensivas de potasio en los fertilizantes también pueden producir una deficiencia de magnesio. El magnesio deriva de varios minerales ferromagnesianos, tales como el olivino, el piroxeno, el anfíbol y la mica, provenientes de las rocas ígneas básicas. Minerales secundarios como los carbonatos entre estos: dolomita $[MgCO_3.CaCO_3]$, magnesita $[MgCO_3]$, talco $[Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2]$, y el grupo serpentina $[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]$ son también fuentes importantes de magnesio en los suelos (Yan & Hou, 2018).

El contenido de magnesio en el suelo varía de 0,5 g/kg a 40 g/kg, pero la mayor parte del contenido de magnesio en el suelo es de 3-25 g/kg. El contenido de magnesio en el suelo está relacionado con el proceso de formación de los suelos, la abundancia, el grado de meteorización y la lixiviación de la materia orgánica en el suelo. Los suelos desarrollados sobre granito y arenisca tienen menos contenido de magnesio, y los suelos generalmente desarrollados a partir de rocas ígneas magmáticas con más magnesia ferrosa son generalmente ricos en magnesio. En zonas húmedas con altas temperaturas, donde el grado de meteorización es alto, el contenido de magnesio soluble se pierde fácilmente por lixiviación, por el contrario, en zonas bajas secas y frías, el magnesio se acumula en el suelo (Yan & Hou, 2018; Magdoff & van Es, 2021).

1.1.23. Azufre (S)

El azufre es considerado un nutriente esencial secundario para las plantas después del nitrógeno, fósforo y potasio. Se requiere para la producción de aminoácidos, que constituyen las proteínas críticas para

el crecimiento de las plantas. La deficiencia de azufre puede reducir significativamente el rendimiento en pastos en suelos arenosos en zonas húmedas debido a la lixiviación (Wilhelm, 2009; Rai et al., 2020).

Las deficiencias de azufre se producen principalmente en suelos arenosos y poco profundos con bajo contenido de materia orgánica, así como en suelos calcáreos y anegados. Desde el punto de vista agrícola se ha demostrado que las aplicaciones de S contribuyen a aumentar el rendimiento de los cultivos y la salud del suelo, mejoran la eficiencia del uso de nitrógeno en las plantas y la producción de proteínas en el aceite de semilla, especialmente en los cultivos de semillas oleaginosas (Rai et al., 2020).

1.1.24. Hierro (Fe)

El hierro es uno de los elementos metálicos más comunes en la corteza terrestre y relativamente abundante en muchos suelos cultivados con una concentración promedio total de 20 a 40 g/kg. Se encuentra como óxidos, hidróxidos, fosfatos, en la estructura de silicatos, en diversos minerales primarios y secundarios (arcillas). Como ion se puede presentar en forma ferrosa (Fe^{+2}) y férrica (Fe^{+3}) con diferente solubilidad. Usualmente las plantas absorben la forma de Fe^{+2} o como quelato. El hierro es un componente esencial de varias enzimas, tales como la peroxidasa, catalasa y citocromo-oxidasa y de la ferredoxina, la cual es esencial en la fotosíntesis y en la fijación de nitrógeno atmosférico (Colombo et al., 2013).

1.1.25. Manganeso (Mn)

El manganeso (Mn) es uno de los 17 elementos esenciales para el crecimiento y la reproducción de las plantas. Aunque las plantas solo requieren pequeñas cantidades de manganeso, este micronutriente es igual de crítico para su desarrollo que los nutrientes principales. El manganeso (Mn) se encuentra principalmente en forma de silicatos, óxidos y combinaciones orgánicas, además de presentarse como especies intercambiables. Las plantas absorben este elemento en forma de Mn^{+2} y quelatos. Su función principal en la planta es activar numerosas

enzimas que intervienen en el metabolismo de los carbohidratos y la fosforilación, así como participar en la reacción de Hill y el mantenimiento estructural de los cloroplastos. En suelos ácidos, el Mn^{+2} predomina en solución o en forma intercambiable. Cuando los suelos contienen un alto contenido de materia orgánica y baja concentración de manganeso, se forman complejos orgánicos MO-Mn, lo que reduce su disponibilidad para las plantas (Gilkes & Mckenzie, 1988; Hughes & Williams, 1988).

1.1.26. Boro (B)

El boro es un elemento cuya función principal es la síntesis de proteínas, participa también en el metabolismo del nitrógeno y carbohidratos, desarrollo del sistema radical, transporte de azúcares, síntesis de pectinas, almidón, transpiración de plantas, en la división celular y en la formación de frutos y semillas. El B es absorbido por las plantas en la forma de $B_4O_7^-$, H_2BO_3 , HBO_3^- y BO_3^- . La disponibilidad de B aumenta con la disminución del pH del suelo, sin embargo, en suelos ácidos con textura arenosa pueden producirse pérdidas por lixiviación (Ahmad et al. 2012).

1.1.27. Molibdeno (Mo)

El molibdeno participa en la fijación simbiótica del nitrógeno y en la síntesis de proteínas y es requerido por las plantas en pequeñas cantidades. En los suelos el contenido de Mo puede estar alrededor de 2 mg/kg, pero una concentración de 0,01 mg/kg de este elemento en la solución del suelo puede ser suficiente para las plantas. En suelos ácidos suelen presentarse problemas de disponibilidad de Mo debido a que reacciona con minerales como los silicatos de hierro y compuestos de aluminio, sin embargo, su solubilidad aumenta a valores de pH entre 5 y 6 (Marks et al., 2015).

1.1.28. Cobre (Cu)

El cobre es un microelemento requerido por las plantas en pequeñas cantidades, sin embargo, cumple importantes funciones en la respiración ya que actúa como un catalizador, es constituyente de enzimas,

participa en la síntesis de clorofila y en el metabolismo de los carbohidratos y de las proteínas. El Cu es absorbido por las plantas como ión cúprico (Cu^{+2}) La concentración de Cu en los suelos puede variar de 2 a 100 mg/kg, dependiendo del material parental. En suelos con altos contenidos de materia orgánica suelen presentarse deficiencias de Cu, así como en suelos con pH alto (Mengel et al., 2001).

1.1.29. Zinc (Zn)

El zinc participa en la formulación de hormonas de crecimiento, síntesis de proteínas, maduración y producción de semillas y granos en las plantas. La forma de absorción es como ión Zn^{+2} . En los suelos la concentración de Zn puede variar desde 10 a 300 mg/kg. El Zn^{+2} es más disponible en suelos con pH ácido y cuando el contenido de materia orgánica es alto disminuye la disponibilidad para las plantas debido a la formación de complejos MO-Zn o quelatos insolubles (Ahmad et al., 2012).

1.1.30. Cloro (Cl)

El cloro es importante para la fertilidad de los suelos, además es un nutriente requerido por las plantas. Sus funciones en el crecimiento y desarrollo de las plantas incluyen la regulación osmótica y estomática, la evolución del oxígeno en la fotosíntesis y la resistencia y tolerancia a las enfermedades. A niveles de suministro adecuados, el Cl mejora los rendimientos y la calidad de muchos cultivos, como la cebolla y el algodón, si los suelos son deficientes en este nutriente. Cuando es excesivo, el Cl puede ser un componente importante del estrés por salinidad y tóxico para las plantas. Las actividades antropogénicas a menudo conducen a una acumulación excesiva del anión de cloro (Cl^-) en los suelos, ya sea mediante la aplicación directa de desechos animales que generalmente son ricos en Cl^- o mediante deposiciones atmosféricas de fuentes industriales y municipales. Una sobreabundancia de Cl^- en el medio ambiente puede afectar la utilización de los suelos agrícolas al disminuir la fertilidad del suelo y causar toxicidad en los cultivos (Christoph-Martin, 2019; Chen et al., 2010).

1.1.31. Níquel (Ni)

El níquel (Ni) es un elemento esencial para las plantas y ejerce un efecto beneficioso sobre el crecimiento de las células de plantas superiores. Aunque existe abundante información sobre la toxicidad del Ni en el suelo y el sistema vegetal, no hay mucha información disponible sobre su nivel crítico de deficiencia (CLD) en suelos y plantas. El contenido de níquel en los suelos varía ampliamente y se ha estimado en un rango de 3 a 1000 mg/kg a nivel mundial, mientras que la gran media se calcula en 22 mg/kg. La solubilidad y la movilidad del Ni aumentan con la disminución del pH, por lo tanto, el pH del suelo es el factor principal para controlar la solubilidad del Ni, así como la movilidad en los suelos (Kumar et al., 2021).

1.1.32. Indicadores biológicos de calidad de los suelos

Las propiedades biológicas del suelo se relacionan con la actividad de macro y microorganismos y con la fertilidad y salud del suelo. Los indicadores biológicos de calidad del suelo integran gran cantidad de factores que afectan la calidad del suelo, como lo son los macro y microorganismos incluidos bacterias, hongos, nemátodos, lombrices de tierra, anélidos y artrópodos, descomposición de la biomasa, la mineralización del carbono y nitrógeno orgánico (Salomé et al., 2016; Herrera et al., 2017).

La salud del suelo considera el estado de las propiedades dinámicas de éste en un momento determinado: contenido y naturaleza de la materia orgánica, la diversidad de organismos y productos microbianos. De acuerdo con FAO (2019) es prioritaria la gestión sostenible del suelo a los fines de incrementar el suministro de alimentos saludables y contribuir a reducir la inseguridad alimentaria de la población mundial. Por lo tanto, se debe minimizar su degradación y restaurar la productividad de los suelos que ya están degradados, especialmente en las regiones del planeta en donde la población es más vulnerable.

1.1.33. Salud del suelo

Se define salud del suelo a la capacidad de este de funcionar como un sistema vivo. Los suelos sanos mantienen una diversa comunidad

de organismos del suelo que ayudan a controlar las enfermedades de las plantas, los insectos y las malas hierbas, forman asociaciones simbióticas beneficiosas con las raíces de las plantas, reciclan los nutrientes vegetales esenciales, mejoran la estructura del suelo con efectos positivos para la capacidad de retención de agua y nutrientes del suelo y, en última instancia mejoran la producción agrícola, así mismo un suelo sano no contamina su entorno, sino que contribuye a mitigar el cambio climático conservando o incrementando su contenido de carbono (FAO, 2016).

1.1.34. Degradación del suelo

Se define como un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios. Los suelos degradados contienen un estado de salud que no pueden proporcionar los bienes y servicios normales del suelo en cuestión en su ecosistema (FAO, 2020).

1.1.35. Degradación física del suelo

Se le denomina degradación física del suelo a la alteración del funcionamiento físico del suelo, que se puede manifestar por la reducción del volumen útil, disminución del espacio poroso, modificación del arreglo estructural, baja en la estabilidad de los agregados, encostamiento y sellado que impiden el intercambio de gases y agua. La degradación física impide que el suelo funcione adecuadamente, ya que afecta la capacidad de transmisión de fluidos, el volumen de almacenaje y modifica el balance adecuado de agua y gases, importante para disolver los nutrientes que necesitan las plantas y microorganismos (Muñoz et al., 2013).

1.1.36. Degradación química de suelos

La degradación química del suelo es un proceso que lleva a la pérdida de la productividad. Ocurre por la adición de sustancias tóxicas en concentraciones que superan su capacidad natural de autodepuración. La acumulación de sustancias a niveles que repercuten en el comportamiento de este supone un nivel tóxico para los organismos del suelo, al tiempo que produce la pérdida total o parcial de los rendimientos

(Jiménez, 2017). Dentro de los procesos de degradación química se pueden mencionar: el agotamiento de nutrientes, lavado excesivo y acidificación, contaminación, salinización, toxicidades, entre otros (López, 2002).

1.1.37. Degradación biológica de los suelos

Está referida principalmente a la pérdida de la MO humificada por efecto de la mineralización acelerada, así como la pérdida de la biodiversidad, efectos sobre la actividad biológica del suelo (López, 2002).

1.1.38. Agricultura convencional

La agricultura convencional se inicia con la Revolución Verde en la década de los cincuenta, y se proyectó como un sistema de producción de alta eficiencia basado en el monocultivo de variedades mejoradas genéticamente para la obtención de altos rendimientos. Para ello se recurre al uso de insumos externos al sistema productivo natural, como energía fósil, intensa mecanización, uso de fertilizantes químicos, abonos químicos, uso de herbicidas, insecticidas, fungicidas. La agricultura convencional no toma en cuenta el ambiente, sus ciclos naturales, ni el uso racional y sostenible de los recursos naturales (Altieri, 2004).

Este sistema de producción no solo alteró el equilibrio ecológico del planeta, debido a la sustitución de ecosistemas naturales por grandes extensiones de tierras sembradas con un mismo cultivo lo cual causó un aumento en el problema de plagas, pérdida de la biodiversidad, erosión cultural y pérdida de variedades tradicionales, aumentando la dependencia económica para adquirir las semillas. Adicionalmente, el uso de maquinaria pesada condujo al deterioro de las propiedades físicas del suelo, aumentando la erosión y compactación. Por otro lado, la utilización de fertilizantes químicos ha sido responsable de la contaminación de suelos y aguas, aumento en la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo que incide en problemas sobre la salud de las personas (Herrera et al., 2017).

La agricultura convencional es un modelo que contribuye a la desigualdad en la distribución de las riquezas, ya que los ingresos por los altos rendimientos son obtenidos por quienes tienen la posibilidad de acceder a la compra de semillas, maquinaria y agroquímicos. Los mayores beneficiados son las empresas de semillas y agroquímicos, esto ha conducido al aumento de la pobreza en el sector campesinado y en consecuencia ha habido un mayor desplazamiento del sector rural a zonas marginales de las grandes ciudades (Altieri, 2004).

1.1.39. Agroecología

Ante la preocupación del impacto negativo que ha sido la agricultura convencional, surge la agroecología como un sistema de producción holístico, en el cual se promueve la biodiversidad e integración de plantas y animales a los fines de aumentar las complejas interacciones y sinergismos, así como la optimización de las funciones y procesos del ecosistema, tales como la regulación biótica de organismos perjudiciales, reciclado de nutrientes, la producción y acumulación de biomasa, permitiendo así al agroecosistema solventar su propio funcionamiento (Altieri, 1992; 2004; Nicholls & Altieri, 2018).

En este tipo de sistemas de producción agroecológica se promueve la diversidad de cultivos, el uso de variedades locales más resistentes a plagas y enfermedades, las rotaciones de cultivo y los sistemas asociados. Se fomenta la disminución de laboreo, el aumento de la cobertura vegetal del suelo, la recuperación de la fertilidad del suelo a través de la aplicación de estiércol, compost, abonos verdes, etc. (Palomo-Campesino et al., 2018; Mancini et al., 2020; Álvarez-Sánchez et al., 2021).

1.1.40. Modelos agroecológicos y su importancia

Un modelo agroecológico es un enfoque de producción agrícola que se basa en los principios de la agroecología y se centra en diseñar sistemas agrícolas que imitan y trabajan en armonía con los ecosistemas naturales, minimizando el uso de insumos externos como fertilizantes sintéticos y pesticidas, y favoreciendo la biodiversidad y la salud del suelo. Estos modelos promueven la diversificación de cultivos, la rotación de cultivos, la utilización de cultivos de cobertura, la conservación del agua y la protección de la biodiversidad. El objetivo principal de un modelo agroecológico es lograr la producción de alimentos de manera sostenible y resiliente, reduciendo la dependencia de recursos no renovables y minimizando los impactos negativos en el entorno. Además, este enfoque también busca fortalecer las comunidades rurales, mejorar la seguridad alimentaria y promover la equidad social en el sector agrícola (Tamayo et al., 2014; Noguera-Talavera et al., 2019).

Los diseños de producción agroecológica buscan mejorar la sustentabilidad económica y ecológica de los agroecosistemas, a través de un sistema de manejo con base en el uso local de los recursos y con una estructura operacional acorde con las condiciones ambientales y socioeconómicas existentes, en el que sea posible la reducción o eliminación de agroquímicos a través de cambios en el manejo, que aseguren la adecuada nutrición y protección de las plantas a través de fuentes de nutrientes orgánicos y un manejo integrado de plagas y enfermedades. Bajo este enfoque se busca resaltar la conservación y mejoramiento de los recursos locales (germoplasma, suelo, fauna benéfica, diversidad vegetal, etc.), enfatizando el desarrollo de una metodología que valore la participación de los agricultores, el uso del conocimiento tradicional y la adaptación de las explotaciones agrícolas a las necesidades locales y las condiciones socioeconómicas y biofísicas (Altieri & Rosset, 1996; Clavijo, 2004; Noguera-Talavera et al., 2019; Mancini et al., 2020).

Los modelos agroecológicos generalmente son usados como un medio para transferir conocimientos, dirigido a un usuario. Diseñar agroecosistemas más biodiversos desde el punto de vista funcional, estructural y florístico constituye un reto hacia el futuro en el uso y manejo holístico de los ecosistemas (Hernández & Faye, 2010; Hernández et al., 2011; Vázquez et al. 2012).

Existen evidencias documentadas del efecto positivo que genera la implementación de modelos de producción agroecológica. Las rotaciones de cultivos, los policultivos, la integración animal y el uso de leguminosas han demostrado un incremento del contenido de materia orgánica de los suelos, estímulo de la actividad biológica, incremento de la actividad micorrízica y antagonista, aumento en la captura, mineralización y reciclaje de nutrientes, mejora de la estructura, conservación de la humedad del suelo y disminución de la erosión (Altieri & Nicholls, 2007; Tapia-Coral et al., 2019; Sahoo et al., 2019).

La diversificación de cultivos (policultivos) reduce los insectos plaga al afectar directamente a los herbívoros o al estimular a los enemigos naturales. Las mezclas de variedades reducen enfermedades, los policultivos con alta cobertura reducen las malezas, los cultivos de cobertura en frutales reducen el ataque de plagas y malezas y la labranza mínima puede reducir enfermedades (Altieri & Nicholls, 2007; CATIE, 2011).

Desde el punto de vista de los rendimientos, por unidad de área pueden ser de 5 a 10% menor comparado con los sistemas convencionales, pero si se consideran otros factores (por unidad de suelo perdido, por unidad de energía, de agua, etc.) son mayores. Sin embargo, puede existir una disminución en la producción durante el período de conversión a manejo orgánico, pero se puede compensar con la sustitución de insumos. La variabilidad en los rendimientos es menor y existe menos riesgo al fracaso productivo ya que las rotaciones incrementan y estabilizan los rendimientos en el largo plazo. Desde un punto de vista económico, el uso de esta tecnología se traduce en menores costos de producción, mayor eficiencia energética, una reducida demanda total de energía y menores costos ambientales. Esto implica una menor depreciación del suelo y disminuye la necesidad de gastos en descontaminación.

Por otro lado, la participación de los agricultores es sumamente importante debido a su papel protagónico en la investigación participativa. Su implicación es clave para lograr resultados exitosos en la integración del conocimiento local y técnico en el diagnóstico de la calidad de los suelos y la implementación de prácticas agroecológicas que conduzcan hacia el uso de agroecosistemas más sostenibles (Ortíz, 2001; Hernández et al., 2011; Sánchez et al., 2015).

1.1.41. Los Sistemas Agroforestales (SAF) y su importancia para la sostenibilidad de los agroecosistemas

Los sistemas agroforestales son una forma de uso del suelo y los recursos naturales en los cuales las especies leñosas perennes (árboles y arbustos, etc.) se utilizan bajo un sistema de manejo integral en combinación con cultivos agrícolas que interactúan biológicamente en un área, o con animales en alguna forma de arreglo espacial o secuencia tiempo con el propósito fundamental de diversificar y optimizar la producción respetando en principio de la sostenibilidad (López, 2010; Moreno-Calles et al., 2013).

De acuerdo con López (2010), los objetivos de los sistemas agroforestales son ampliamente reconocidos, entre las cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Mejor protección y mejoramiento de las propiedades físicas y químicas del suelo.
- Lograr más de un tipo de cosecha o producto para los productores, lo cual les asegura una mayor estabilidad y retornos económicos más sostenidos a mediano y largo plazo.
- Obtener subproductos, tales como leña, postes, miel y otros, que mejorarán la calidad de vida de los productores.
- Aumentar la eficiencia biológica del sistema, que ayudará a un incremento de la productividad no solo para un granjero, sino para toda la comunidad o región.
- Evitar la agricultura migratoria, permitiendo mayor arraigo de los productores, con planes de producción a largo plazo.
- Aumentar la fertilidad del suelo, mejorando los niveles de materia orgánica y la fijación de nitrógeno atmosférico con las leguminosas.
- Lograr la conservación del suelo, reduciendo la erosión con una cobertura más permanente del suelo.
- Reciclar los nutrientes provenientes de los cultivos, especies forestales y producción pecuaria.
- Mejorar las condiciones del medio ambiente, respetando el concepto de producción sostenible.

1.1.42. Características de los SAF

Según Farrell & Altieri (1999) y Montagnini et al., (2015) en cuanto a la estructura, los sistemas agroforestales pueden agruparse de la siguiente manera:

Sistema agrosilvopastoril: combina cultivos agrícolas, árboles y pastoreo animal en la misma área. Esto permite la producción de alimentos, forraje y madera en un solo sistema, promoviendo la diversidad de productos y la captura de carbono.

Sistema silvopastoril: similar al agrosilvopastoril, pero con un enfoque más centrado en la combinación de pastoreo y árboles. Los árboles proporcionan sombra a los animales, mejoran la calidad del pasto y contribuyen al almacenamiento de carbono.

Sistema agroforestal Taungya: implica la siembra de cultivos agrícolas entre árboles jóvenes recién plantados. A medida que los árboles crecen, proporcionan sombra y protección a los cultivos. Una vez que los árboles maduran, pueden ser cosechados para madera u otros fines.

Sistema agroforestal secuencial: en este sistema, diferentes tipos de cultivos se rotan en la misma parcela a lo largo del tiempo, junto con árboles. Esto optimiza el uso del espacio y los recursos, al tiempo que mantiene la productividad del suelo y la biodiversidad.

Sistema de plantación forestal comercial con cultivos agrícolas: Aquí, se establecen plantaciones de árboles con el propósito principal de producción maderera, pero se cultivan cultivos agrícolas entre las filas de árboles para aprovechar la tierra subutilizada y diversificar los ingresos.

Sistema agroforestal en terrazas: se implementa en laderas y colinas, donde se construyen terrazas que contienen cultivos agrícolas y árboles. Las terrazas ayudan a prevenir la erosión del suelo y permiten un uso más eficiente del terreno.

Sistema de huertos familiares: en este tipo de sistema, se cultivan árboles frutales y cultivos agrícolas juntos en pequeñas parcelas. Proporciona alimentos para la familia y, a menudo, excedentes para la venta.

Sistema agroforestal en franjas: se establecen franjas de árboles y arbustos en medio de cultivos agrícolas. Estas franjas ayudan a reducir la erosión del suelo, actúan como cortavientos y proveen hábitats para polinizadores y fauna.

Sistema agroforestal multiestrato: implica la estratificación vertical de diferentes especies de árboles y plantas en diferentes niveles. Esto maximiza el uso del espacio, aumenta la biodiversidad y proporciona una variedad de productos.

Sistema agroforestal urbano: se aplica en entornos urbanos, donde se combinan árboles, arbustos y cultivos en espacios limitados. Estos sistemas pueden proporcionar alimentos frescos, mejorar la calidad del aire y embellecer áreas urbanas.

También existen otros factores que se deben de tomar en cuenta para la implementación de los sistemas de policultivos, factores como: tipos de suelo, clima, época de cultivos, adecuación de plantas, factores edáficos, sociales y económicos, entre otros, que siempre se tienen que considerar para la planeación e implementación de estos sistemas en los campos agrícolas, ya que una mala planeación y estructuración de sistemas pueden causar una desregularización al suelo y repercutir en los cultivos sembrados y por sembrar, cosa que representan riesgos en la inversión del productor.

El proceso de conversión de sistemas convencionales de monocultivos con alta dependencia de insumos externos a sistemas diversificados de baja intensidad de manejo es de carácter transicional y se compone de tres fases (Altieri & Nicholls, 2007):

- Eliminación progresiva de insumos agroquímicos mediante la racionalización y mejoramiento de la eficiencia de los insumos externos vía estrategias de manejo integrado de plagas, enfermedades, malezas, suelos, etc.
- Sustitución de insumos sintéticos por otros alternativos u orgánicos.
- Rediseño diversificado de los agroecosistemas con una infraestructura diversificada y funcional que subsidia el funcionamiento del sistema sin necesidad de insumos externos sintéticos u orgánicos.

Los procesos a tener en cuenta en esta conversión, según Altieri (2004), son:

- Aumento de la biodiversidad tanto sobre como debajo del suelo.
- Aumento de la producción de biomasa y el contenido de materia orgánica del suelo.
- Disminución de los niveles de residuos de pesticidas y la pérdida de nutrientes y agua.
- Establecimiento de relaciones funcionales y complementarias entre los diversos componentes del agroecosistema.
- Óptima planificación de secuencias y combinaciones de cultivos y animales, con el consiguiente aprovechamiento eficiente de recursos locales.

En tal sentido, el objetivo de este libro es presentar los resultados de la investigación en la que se evaluó la influencia de tres modelos agroecológicos sobre la calidad del suelo en el municipio de Ocaña, Norte de Santander.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Impacto de diversas prácticas agroecológicas y no agroecológicas en la calidad de los suelos

Los sistemas agroforestales desempeñan un papel crucial en la promoción de prácticas sostenibles que abordan los desafíos del cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la inseguridad alimentaria. Su enfoque holístico y sus beneficios interconectados hacen que sean una herramienta valiosa para la gestión responsable de los recursos naturales y el bienestar humano. Los sistemas agroforestales tienen un impacto significativo en la captura y almacenamiento de carbono, lo que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a mitigar el cambio climático. La combinación de árboles y cultivos

incrementa la absorción de carbono atmosférico, contribuyendo a la estabilización del clima global (Aryal et al., 2022). Por ejemplo, los sistemas silvopastoriles promueven la biodiversidad en paisajes ganaderos, lo que a su vez contribuye al almacenamiento de carbono. La diversidad de especies vegetales y animales crea ecosistemas más equilibrados y funcionales, aumentando la eficiencia en la captura y retención de carbono.

En un estudio llevado a cabo por Furcal-Beriguete et al. (2023) se evaluó el efecto de un sistema agroforestal (SAF) integrado por *E. guineensis*, *C. megalantha*, *T. cacao* y *Musa* sp, y el monocultivo de *E. guineensis* sobre la fertilidad de los suelos en la provincia de Punta Arenas, Costa Rica durante un período de dos años. En este estudio se encontraron pocas diferencias estadísticas en la mayoría de las variables con excepción del contenido de fósforo el cual fue significativamente más alto en el SAF y disminuyó con la profundidad del suelo 0-20 cm a 20-40 cm. La materia orgánica varió entre 2,01 %-4,14 % en ambos tratamientos (monocultivo y SAF) y fueron mayores en el segundo año con respecto al primer año. Estos resultados demuestran que en términos generales los sistemas agroforestales han demostrado un efecto positivo sobre las propiedades de los suelos, pero un tiempo de evaluación de dos años no es suficiente para evidenciar tales impactos.

Aryal et al. (2022) midieron la biomasa arbórea y las reservas de carbono orgánico del suelo (COS) en bancos de forraje, cercas vivas, pastizales con árboles dispersos, bosques secundarios y bosques primarios de tres regiones geográficas diferentes y los compararon con pastizales abiertos convencionales, respectivamente; y encontraron que los sistemas silvopastoriles y áreas boscosas remanentes en paisajes ganaderos condujeron a un aumento en la cantidad total de carbono almacenado tanto en la biomasa vegetal y el suelo, entre un 27 % y un 163 % más de carbono en comparación con los pastizales abiertos. De acuerdo con los hallazgos encontrados concluyeron los sistemas silvopastoriles y la conservación de bosques remanentes desempeñan un papel crucial en el almacenamiento de carbono en paisajes dominados por la ganadería en México.

Los sistemas agroforestales además de incrementar el secuestro de carbono contribuyen enormemente a mejorar la salud del suelo. Por ejemplo, Eddy & Yang (2022) compararon varios sistemas, incluyen-

do el sistema agroforestal, monocultivos y áreas de referencia no perturbadas. En Iowa, EE. UU. El sistema agroforestal (AF) estuvo conformado por especies de castaño chino (*Castanea mollissima* Blume) y papaya (*Asima trilobal* (L.) Dunal) en Iowa, el manejo convencional de cultivos anuales estuvo representado por la rotación de maíz y soja (CSR) y bosques secundarios, este último sistema sirvió como un punto de referencia natural del ecosistema leñoso perenne para mejorar la salud del suelo. También se compararon asociaciones de AF de castaño y papaya, incluidos el monocultivo de castaño de densidad simple y doble, el monocultivo de papaya y el policultivo de castaño y papaya, para evaluar los efectos de la densidad de árboles versus diversidad en la salud del suelo. Se encontró que el sistema agroforestal mostró mejoras significativas en la salud del suelo en comparación con los monocultivos y las áreas de referencia. Esto se manifestó en un aumento en la materia orgánica del suelo, mejor estructura y mayor actividad microbiana lo cual fue asociado a la presencia de árboles y una mayor diversidad vegetal contribuyeron a la acumulación de carbono en la biomasa vegetal y el suelo. Adicionalmente, la combinación de diferentes especies vegetales y la presencia de árboles proporcionaron hábitats variados para la flora y la fauna, lo que contribuyó a la diversidad biológica del sistema.

En otro estudio se estimó el almacenamiento de carbono en biomasa aérea, necromasa y el carbono orgánico del suelo (COS) bajo un sistema agroforestal con cacao (SAF cacao), café (SAF café), sistemas silvopastoriles (SPS) y bosque en Mesetas, Meta, Colombia. La mayor acumulación de COS se encontró en los suelos del bosque, superando en 59, 72 y 73 % SAF cacao, SSP y SAF café, respectivamente. Las familias botánicas Fabaceae, Lauraceae y Primulaceae presentaron el mayor almacenamiento de carbono. En SAF cacao, la mayor acumulación de carbono se encontró en especies para alimentación humana; en SAF café y SSP, el mayor almacenamiento lo presentaron las especies maderables. En este estudio se demostró el potencial que tienen estos sistemas productivos para almacenar COS por lo que se recomienda diseñar estrategias que permitan integrar acciones para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la economía campesina local (Hernández Núñez et al., 2021).

Un aspecto importante de los beneficios que ofrecen los sistemas agroforestales tiene que ver con la promoción de la diversidad de organismos en los suelos. Quiroz et al. (2021) realizaron una caracterización de la macrofauna edáfica en tres diferentes sistemas agroforestales compuestos de la siguiente manera: CMIEA: Café, musáceas, Inga, Erithryna y árboles, CIE: Café, Inga, Erithryna y árboles y CA: Café y árboles en época seca y época lluvioso, en la región de San Ramón, en el Departamento de Matagalpa, Nicaragua. Encontraron que la macrofauna, compuesta por organismos como lombrices de tierra, escarabajos y otros invertebrados, fue diversa y abundante en los diferentes sistemas. Se encontraron diferencias significativas en la composición y abundancia de la macrofauna entre los diversos sistemas agroforestales estudiados. Esto sugiere que la estructura del sistema agroforestal, incluyendo la combinación de árboles y cultivos, influyó en la presencia y la comunidad de la macrofauna edáfica. Se observó que la presencia de árboles en los sistemas agroforestales tuvo un impacto positivo en la diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica. Los árboles proporcionaron hábitats adicionales y aumentaron la materia orgánica en el suelo, lo que favoreció la actividad de la macrofauna.

Un estudio similar fue desarrollado por Asfaw & Zewudie (2021) quienes evaluaron la abundancia y biomasa de la macrofauna del suelo, así como propiedades del suelo seleccionadas en sistemas agroforestales basados en café y jardines familiares en Wondo Genet, Etiopía. En el estudio se identificó y cuantificó la macrofauna del suelo en los sistemas agroforestales basados en café y en los jardines familiares. Se encontraron diferencias en la abundancia y biomasa de la macrofauna entre los dos tipos de sistemas, lo que indica que la presencia de árboles, la cantidad de materia orgánica y las prácticas de manejo en cada sistema, así como la estructura del sistema influyen en la comunidad de macrofauna. Se observó una diversidad de organismos de macrofauna en ambos tipos de sistemas tales como especies de lombrices, escarabajos y otros invertebrados, lo que indica la importancia de estos sistemas para mantener la biodiversidad del suelo. El estudio también evaluó propiedades del suelo como la textura, el contenido de carbono orgánico y el pH en relación con la abundancia de la macrofauna. Se encontraron correlaciones significativas entre la abundancia de la macrofauna y algunas de estas propiedades del suelo, lo que sugiere su influencia en la comunidad de macrofauna.

Los sistemas agroforestales tienen un efecto positivo importante en las propiedades de los suelos. Los sistemas agroforestales de cacao han sido considerados como uno de los más conservacionistas en cuanto a la biodiversidad y protección de los suelos. A este respecto, Rodríguez-Suárez et al. (2021) evaluaron el impacto de los sistemas agroforestales de cacao sobre la fertilidad del suelo en comparación con el bosque natural y pastizales en la Amazonía colombiana. Los sistemas de cacao agroforestal presentaron una mayor acumulación de materia orgánica, mayor capacidad de retención de agua y niveles de nutrientes como nitrógeno y fósforo más altos en comparación con los pastizales. Se encontró también que los sistemas agroforestales de cacao tenían valores de fertilidad del suelo similares a los del bosque natural circundante. Esto indica que los sistemas de cacao agroforestal pueden mantener o incluso mejorar la calidad del suelo en comparación con el ecosistema de bosque. Además de la mejora de la fertilidad del suelo, los sistemas agroforestales de cacao promovieron la biodiversidad en comparación con los pastizales, ya que ofrecen hábitats más ricos y diversos para las plantas y la fauna.

Se ha demostrado que los sistemas agroforestales pueden llegar a capturar tanto carbono en el suelo tal como ocurre en los bosques nativos. Carvajal-Agudelo y Andrade (2020) investigaron la captura de carbono en la biomasa de varios sistemas, incluyendo bosque nativo, bosque secundario, pastizales y sistemas agroforestales en el municipio de Yopal, Colombia. En este estudio, aunque el sistema de bosque nativo presentó la mayor captura de carbono en su biomasa, seguido de cerca por el bosque secundario, se encontró que los sistemas agroforestales también mostraron una capacidad significativa para capturar carbono en comparación con los pastizales. El hecho de que el bosque nativo haya demostrado ser el mejor sistema en términos de captura de carbono no es sorprendente y está en línea con lo que se conoce sobre la capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar grandes cantidades de carbono. Los bosques acumulan carbono en la biomasa de los árboles, la vegetación y en el suelo a lo largo de décadas y siglos. La estructura compleja y la diversidad de especies de los bosques promueven una mayor acumulación de carbono en comparación con otros sistemas. Sin embargo, el hallazgo de que los sistemas agroforestales también tienen una capacidad significativa para capturar carbono es alentador puesto que estos sistemas involucran la com-

binación de árboles con cultivos o pastizales, y esta interacción puede aumentar la captura de carbono en comparación con sistemas agrícolas convencionales. Los árboles en los sistemas agroforestales contribuyen a la captura de carbono en su biomasa y también mejoran la calidad del suelo, lo que puede aumentar la retención de carbono en el suelo.

La producción ganadera convencional es la segunda actividad responsable de emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Los sistemas agrosilvopastoriles y silvopastoriles pueden reducir y compensar las emisiones de GEI al aumentar la captura de carbono en la biomasa aérea y subterránea principalmente mediante la integración de ganado y bosques. A este respecto, Torres et al. (2017) estimaron las emisiones de GEI, la producción de biomasa aérea de árboles y pastos y el almacenamiento de carbono en cuatro sistemas agrosilvopastoriles y silvopastoriles en el sureste de Brasil. Los sistemas agrosilvopastoriles estuvieron compuestos por maíz (*Zea mays*) y *Eucalyptus saligna* (sistema 1), y frijol (*Phaseolus vulgaris*) y *E. urophylla* x *E. grandis* (sistema 2), los sistemas silvopastoriles (3 y 4) tuvieron pasto (*Brachiaria decumbens*) + *E. urophylla* x *E. grandis*. Las emisiones de GEI totales fueron de 7,98, 4,25, 4,04 y 2,80 t CO₂e ha⁻¹, en los sistemas 1, 2, 3 y 4, respectivamente. El promedio anual de emisiones de GEI osciló entre 0,93 y 1,60 t CO₂e ha⁻¹ año⁻¹, lo que puede considerarse bajo en comparación con otros sistemas, probablemente debido al uso de labranza cero y la adopción de sistemas agroforestales con uso reducido de maquinaria. Por otro lado, los regímenes óptimos de fertilización/estiércol pueden aumentar la captura de carbono y reducir las emisiones de GEI. Esta combinación proporciona beneficios ambientales adicionales, como la reducción y prevención de la erosión del suelo, un uso más eficiente del agua y una mejora de la biodiversidad.

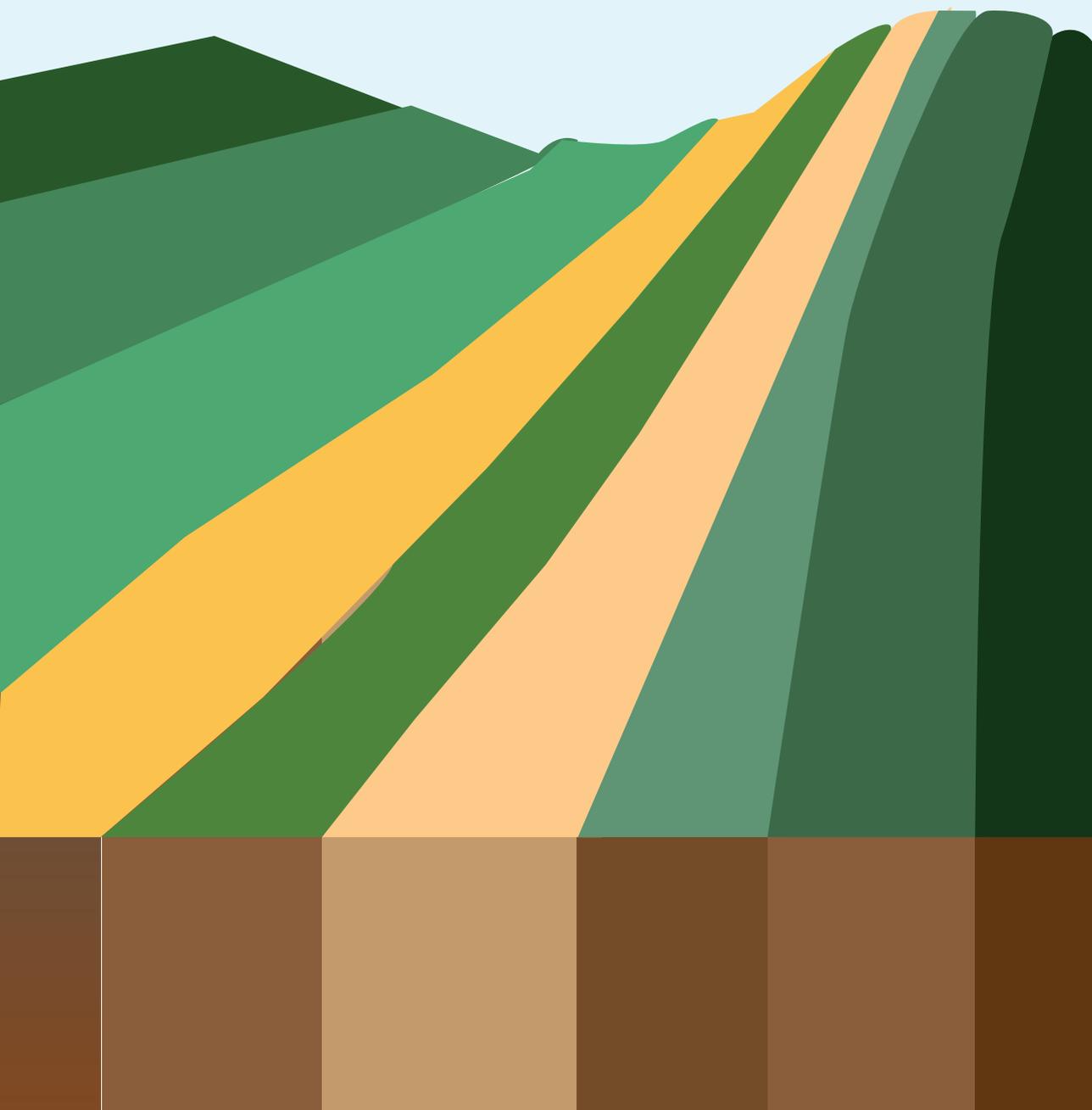
Las reservas de carbono en el suelo y su origen bajo diferentes sistemas agroforestales de cacao, bosque natural y pasto a una profundidad de 100 cm en el sur de Bahía, Brasil fue evaluada por Monroe et al. (2016). El origen del COS se evaluó utilizando la relación isotópica ¹³C como indicador de la contribución relativa de árboles (plantas C3) y pastos (plantas C4), después de 4 años de conversión de pastos en SAF de cacao y caucho. Los SAF de cacao y caucho fueron los sistemas más eficientes en la acumulación de COS en los primeros 20 cm de de suelo y, en consecuencia, hasta los 100 cm de profundidad. El

cacao fue más eficiente que el árbol del caucho para acumular C3 derivado. Mientras que el caucho aumentó casi un 70 % de C3, el cacao aumentó un 131 %. Después de los 40 cm de profundidad, el SOC sigue siendo del bosque natural original.

Otro estudio similar fue desarrollado por Casanova-Lugo et al. (2011) quienes realizaron una revisión sobre la importancia de los sistemas agroforestales en el trópico mexicano y concluyen que este tipo de agroecosistemas ofrecen múltiples beneficios, desde la captura de carbono hasta la mejora de la biodiversidad y la resiliencia local. Además, representan una alternativa prometedora para abordar los desafíos ambientales y sociales en la región.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA



METODOLOGÍA

2.1. Descripción de área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el municipio Ocaña, departamento Norte de Santander. Este departamento se encuentra ubicado en la zona nororiental del país, sobre la frontera con Venezuela, en las coordenadas 06°56'42' y 09°18'01'' de latitud norte y los 72°01'13'' y 73°38'25'' de longitud oeste. Tiene una extensión de 21.827,05 km² (2.182.705 ha), que equivalen al 1,89% del territorio nacional (1.148.706 km²). Limita al norte y al este con Venezuela, al sur con los departamentos de Boyacá y Santander, y al oeste con Santander y Cesar. El departamento de Norte de Santander hace parte de la región Andina, siendo ésta la más densamente poblada del país (Figura 1).

Para esta investigación se escogió el municipio de Ocaña debido a su potencial económico en cultivos promisorios y a sus características agroecológicas, que permiten diseñar modelos técnicos para el sostenimiento ecológico de los sistemas de producción de la zona. El municipio de Ocaña se encuentra ubicado en la subregión noroccidental de Cordillera Oriental, en la parte Centro Occidental del departamento Norte de Santander. Su extensión aproximada es de 627,72 km², lo que representa el 2,76 % del área total del Departamento, con 6,96 km² de extensión urbana. Está situado entre los 8°14'15" de latitud norte y los 73°2'26" de longitud oeste. Su altitud promedio es de 1202 msnm, con una máxima de 2065 msnm y una mínima de 761 msnm, y presenta una temperatura media de 22 °C. La zona presenta un clima tropical húmedo y seco, con precipitaciones anuales que oscilan entre los 1000 y 2000 mm, con una distribución bimodal. Durante el primer semestre del año, las lluvias son escasas, mientras que en los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre se concentran las mayores precipitaciones, lo que se aprovecha para los cultivos semestrales (Gobernación de Norte de Santander, 2014; CORPONOR, 2010).

Figura 1

Mapa de ubicación del municipio Ocaña, Norte de Santander



Fuente. IGAC (2002).

Se seleccionaron 15 fincas, cada una con una superficie de dos hectáreas para el establecimiento de los modelos agroecológicos. Las veredas seleccionadas fueron Cotorreras, Alto San Jacinto, Santa Rita, La Honda, Las Chircas, Quebrada El Rosal, El Limón y Santa Lucía. Las fincas seleccionadas fueron las siguientes: El Caimito, Doña Juana, Los Guasimales, El Porvenir, Villa Ángel, La Estrella, Casitas, El Caracol, Mosquera, San Jacinto, Vida Tranquila y El Motilón II.

2.2. Tipo de investigación

Se llevó a cabo una investigación cuantitativa, experimental, de campo y laboratorio con un enfoque del participativo y su alcance comprendió la valoración de los cultivos implementados en las 15 fincas del municipio Ocaña, la validación de modelos agroecológicos para la producción de cultivos promisorios en condiciones de un desarrollo sostenible y la identificación de la cadena de valor para los productos dispuestos en el modelo.

2.3. Población de estudio

En la selección de las familias participantes del proyecto de investigación, se utilizó la información del último censo del DANE (2015), que abarcaba toda la población agrícola del departamento de Norte de Santander y los datos proporcionados por la Secretaria de Desarrollo Económico de la Gobernación de Norte de Santander (Gobernación del departamento Norte de Santander, 2016).

2.4. Muestra

La muestra se calculó con la fórmula matemática para la determinación del tamaño muestral (n) en muestreo aleatorio simple (1). Al aplicar la fórmula se obtuvo un tamaño de muestra de 15 familias.

$$n = \frac{Z^2 (p*q) / (e^2 + (Z^2(p*q)))}{N}$$

Donde,

n = Tamaño de la muestra.

Z = Grado de confianza. Para esta investigación, se aplicó una confiabilidad del 95%, el cual es el valor de Z siendo este equivalente a 1,96 para que la información sea viable y confiable.

e = Margen de error. Para este proyecto el margen utilizado es del 0,1%.

N = Tamaño de la población, total de fincas que integran el proyecto en el municipio.

p = probabilidad de éxito es de 50%, es decir, 0,5%.

q = probabilidad de fracaso es de 50%, es decir, 0,5%.

Para la selección de las familias y en consecuencia las fincas en las que se implementarían los modelos agroecológicos se usaron los siguientes criterios:

- Fincas con vocación agrícola.
- Área disponible de tierra de tres hectáreas.
- Disponer de dos hectáreas para el desarrollo del proyecto.
- Ser reconocido como pequeño productor agrícola de acuerdo con el decreto 780 de 2011 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2011).
- Manifestar interés y compromiso con el proyecto.
- No haber participado en proyectos similares.
- Leer y escribir.

2.5. Selección de los modelos agroecológicos

En el mes de febrero de 2018 se realizó una actividad de socialización y sensibilización con los agricultores y funcionarios de la Alcaldía del municipio de Ocaña con el fin de seleccionar las 15 familias participantes en la investigación. El ajuste participativo se realizó a partir de la confección previa de un guion para la conducción de la actividad y se entrenaron a los moderadores respecto a la investigación a desarrollar, sus objetivos concretos y la metodología a utilizar (FAO, 2008). La actividad se inició con la presentación de los participantes mediante una técnica de trabajo grupal o dinámica de grupo que permitió a los presentes obtener como lección aprendida “la importancia del líder en un grupo de trabajo”, cuyo objetivo fue que los agricultores participantes se convirtieran en líderes agroecológicos y de los sistemas agroforestales en la zona.

Se realizaron mesas de trabajo con los agricultores y se trabajó finalmente en sesión plenaria. Tanto en las mesas de trabajo como en el plenario se dio libertad a los participantes para que realizaran su análisis y las propuestas de los cultivos promisorios más adecuados para los modelos agroecológicos en el municipio de Ocaña. Bajo la guía de un facilitador o moderador, los criterios sobre los cultivos y especies forestales de los modelos agroecológicos propuestos fueron reflejados en un papelógrafo, así como la propuesta de los nuevos cultivos. Durante el proceso de trabajo de la mesa técnica el moderador seleccionó un líder por equipo para que expusiera en el plenario. Cada líder expuso las propuestas de su equipo y se sometieron a debate y después a consenso donde fueron aprobados los modelos agroecológicos definitivos para el municipio de Ocaña.

La actividad se inició con la presentación de los participantes y una dinámica de grupo que permitió a los agricultores participantes convertirse en líderes del proceso. Tanto en las mesas de trabajo como en el plenario, se utilizó como instrumento de investigación una versión de la matriz FODA para que los agricultores expusieran y relacionaran en un papelógrafo bajo la guía de un facilitador o moderador, las fortalezas y debilidades, y las amenazas y oportunidades (FODA) de los diseños agroecológicos, así como un plan de acción para las mejoras de estos.

El rol de moderación fue desempeñado por un individuo reconocido en la comunidad, con una sólida trayectoria en este ámbito, lo cual promovió la espontaneidad entre los participantes. El lenguaje empleado se adaptó al nivel educativo de los agricultores, con el propósito de destacar los aspectos positivos, negativos, las amenazas y las oportunidades de perfeccionamiento en los modelos agroecológicos. Todo esto fue articulado mediante un enfoque analítico FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas).

Tras la creación de la matriz FODA, se solicitó a los miembros del panel que formularan sus sugerencias para el mejoramiento de los modelos agroforestales. Esto permitiría que los enfoques más exitosos fueran adoptados por otros agricultores de la región, contribuyendo así a la sostenibilidad del proyecto basándose en los resultados logrados y generando perspectivas de mejora para futuros proyectos similares.

Finalmente, mediante un proceso de consenso basado en los resultados obtenidos de la matriz FODA, se procedió a la selección de los modelos que se anticipa tendrán un mayor éxito. La Tabla 1 detalla tanto los modelos propuestos inicialmente como aquellos que finalmente fueron elegidos. Para esta selección, se consideraron las particularidades geográficas y las condiciones agroecológicas de cada región, resultando en la elección de cinco fincas por cada modelo.

Cada uno de estos modelos presentó una estructura que comprendía un componente de cultivo forestal, otro de cultivo permanente y uno más de cultivo transitorio. El Modelo 1 incluyó la especie forestal nogal cafetero (*Cordia alliodora* Ruiz & Pav. Oken), el cacao (*Theobroma cacao* L.) como cultivo permanente y el plátano (*Musa paradisiaca* L.) como cultivo transitorio. El Modelo 2 estuvo conformado por las especies nogal cafetero (*Cordia alliodora* Ruiz & Pav. Oken), el cacao (*Theobroma cacao* L.) y plátano (*Musa paradisiaca* L.) y, por último, el Modelo 3 estuvo estructurado por las especies nogal cafetero (*Cordia alliodora* Ruiz & Pav. Oken), aguacate (*Persea americana* Miller.) y maíz (*Zea mays* L.)

Tabla 1

Descripción de las fincas y los modelos agroecológicos propuestos y los seleccionados

Nº	Finca	Altitud (msnm)	Modelo	Modelo agroecológico propuesto	Modelo agroecológico seleccionado
1	El Zancudo	1248	1	Nogal Cafetero-Limón-Frijol/Maíz	Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P)
2	San José	1436			
3	Zorro Cuco	1290			
4	El Caimito	1333			
5	Doña Juana	1234			
6	Los Guasimales	1251	2	Nogal Cafetero-Cacao-Plátano	Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)
7	El Porvenir	1195			
8	Villa Ángel	1252			
9	La Estrella	1234			
10	Casitas	1373			
11	El Caracol	1243	3	Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol o Maíz*Pepino	Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)
12	Mosquera	1434			
13	San Jacinto	1425			
14	Vida Tranquila	1173			
15	El Motilón II	1248			

Fuente. Equipo de investigador

2.6. Diseño e implementación de los modelos agroecológicos

La implementación de los modelos agroecológicos se llevó a cabo considerando las directrices técnicas proporcionadas por el asesor en términos de trazado, ahoyado, distancias de siembra, riego, fertilización, y control de plagas y enfermedades. En contraste, el modelo testigo se estableció siguiendo prácticas convencionales como optaron los agricultores. En cada una de las fincas se establecieron dos parcelas experimentales: una fue sometida a fertilización orgánica mientras que la otra siguió un enfoque de manejo convencional.

2.7. Preparación del suelo, siembra y fertilización de los tres modelos

El diseño y la implementación de los modelos agroecológicos se llevaron a cabo con una meticulosa planificación para asegurar la sinergia y sostenibilidad de sus componentes. Para establecer los modelos, se seleccionaron cinco fincas por modelo, las cuales estuvieron distribuidas equidistantemente entre sí, con el propósito de asegurar condiciones agroecológicas uniformes entre modelos. El proceso de preparación del suelo, siembra y fertilización se desarrolló según los siguientes pasos:

2.8. Preparación de suelos

Se dio inicio con un análisis exhaustivo de las condiciones del suelo, teniendo en cuenta factores como el pH, los nutrientes y la textura. Posteriormente, se llevó a cabo una labranza apropiada con el objetivo de eliminar las malezas y permitir la permeabilidad del suelo al agua y al aire, evitando sin embargo alterar la capa superior del suelo.

2.9. Siembra

Se determinó la disposición espacial de las tres especies teniendo en cuenta sus respectivas necesidades de espacio y exposición solar. En el caso del Modelo 1: Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P), se procedió a plantar las plántulas de nogal cafetero con un espacio adecuado entre individuos, utilizando una distancia de 20 m x 20 m. A continuación, se establecieron las plántulas de cacao en coordinación con los Nogales Cafeteros, manteniendo una separación de 5 m x 5 m, aprovechando su sombra natural beneficiosa. En los espacios remanentes, se intercalaron las plántulas de plátano, beneficiándose de la protección proporcionada por las otras especies. En este caso, se mantuvo una distancia de plantación de 2,5 m x 2,5 m para los plátanos.

El Modelo 2: Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F) se implementó con una disposición específica en cuanto a las distancias de siembra. Los nogales cafeteros se plantaron respetando un espacio de 20 m x 20 m entre individuos. Para los árboles de aguacate, se eligió una distancia de 8 m x 8 m, garantizando un equilibrio adecuado. En

cuanto al cultivo de frijol, se estableció con una separación de 3,5 m x 2,5 m entre las plantas, optimizando el aprovechamiento del terreno. Finalmente, el Modelo 3: Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M) siguió un patrón de siembra similar al Modelo 2 (Tabla 2).

Estos modelos agroecológicos se basaron en la interacción positiva entre las especies, aprovechando las sinergias y beneficios mutuos como sombra, protección contra vientos y erosión, aprovechando la biodiversidad del sistema. Es relevante destacar que en ninguna de las fincas se llevó a cabo deforestación con el propósito de establecer los modelos de cultivo.

2.10. Fertilización

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo del suelo con el propósito de identificar sus necesidades nutricionales específicas. En la parcela agroecológica, se utilizaron diversos abonos orgánicos para enriquecer el suelo: se aplicaron enmiendas como cal dolomítica según las recomendaciones derivadas de los análisis de suelos. También se empleó roca fosfórica para satisfacer las necesidades de fósforo de los cultivos y se administraron abonos orgánicos tales como humus sólido, biofertilizantes y micorrizas. Por otro lado, en la parcela de control o testigo se siguió un enfoque convencional con el uso de fertilización química.

2.11. Manejo de plagas y enfermedades

El manejo de plagas y enfermedades en los tres modelos se realizó siguiendo un plan integral que abarca diversas etapas: prevención, control cultural, control biológico en la parcela agroecológica, control químico en la parcela testigo, monitoreo continuo, registro y seguimiento, así como capacitación a los productores.

En la fase de prevención, se llevaron a cabo inspecciones regulares para detectar tempranamente signos de plagas o enfermedades. Además, se implementaron medidas de manejo de malezas con el fin de reducir los refugios para las plagas.

El control cultural incluyó la realización de podas sanitarias para eliminar ramas y hojas enfermas, con el objetivo de evitar la propagación de enfermedades.

En la parcela agroecológica, se adoptó un enfoque de control biológico mediante la introducción de depredadores o parasitoides específicos para el control natural de las plagas.

En la parcela testigo, se llevó a cabo control químico cuando se detectaron plagas o signos de enfermedades. Para ello, se utilizaron los productos Adral 20 g, Nemocrop 40 g, Dipel 25 g y Protector 20 g por bomba, aplicando las dosis recomendadas por el fabricante. La aplicación se realizó mezclando los productos en una bomba de pulverización, agregando agua hasta alcanzar el volumen deseado, y luego se aplicó de manera uniforme.

El monitoreo continuo fue esencial, supervisando regularmente cada cultivo para identificar cualquier cambio en la presencia de plagas o enfermedades. Las acciones de manejo se ajustaron según la gravedad de la infestación. Se mantuvo un registro detallado de las intervenciones realizadas y sus resultados, con el propósito de evaluar la eficacia de los métodos y productos utilizados y mejorar las estrategias futuras.

En cuanto a la educación y capacitación se brindó formación a los agricultores y trabajadores para identificar tempranamente plagas y enfermedades, además, de promover la adopción de prácticas integradas de manejo. Cabe destacar, que el sistema de riego utilizado fue un sistema de aspersión que se aplicó de manera similar tanto en la parcela agroecológica como en la testigo.

Tabla 2

Descripción de los modelos agroecológicos

Modelo	Modelo agroecológico	Especie	Distancias de siembra (m)	Número de plantas/ha
1	Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P)	Nogal Cafetero	20 * 20	25
		Cacao	5 * 5	400
		Plátano	2,5 * 2,5	1600
2	Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)	Nogal Cafetero	20 * 20	25
		Aguacate	8 * 8	156
		Frijol	0,5 * 0,3	66666
3	Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)	Nogal Cafetero	20 * 20	25
		Aguacate	8 * 8	156
		Maíz	0,5 * 0,3	66666

Fuente. Equipo de investigador

2.12. Caracterización taxonómica de los suelos

La caracterización taxonómica de los suelos en el municipio de Ocaña brindó un entendimiento detallado tanto del patrón de distribución de los diversos tipos de suelos delimitados, como de la evaluación de la oferta edáfica y las limitaciones específicas presentes en cada unidad taxonómica. Para llevar a cabo este proceso, se realizó una minuciosa revisión del Estudio General de Suelos del departamento de Norte de Santander (IGAC 2012).

La clasificación taxonómica de los suelos se llevó a cabo siguiendo la metodología empleada tanto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Soil Survey Staff, 2014) como por la Subdirección Agrológica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2007).

La selección de las fincas destinadas a la caracterización taxonómica de los suelos se basó en criterios como la variabilidad espacial del paisaje, las características topográficas (como sierras, colinas, llanuras ras, entre otros) y las particularidades de los suelos en cada área. Como resultado de esta selección, se identificaron y escogieron seis de las 15 fincas participantes (Tabla 3).

Tabla 3

Fincas seleccionadas para la caracterización taxonómica de los suelos en cada modelo agroecológico en el municipio de Ocaña, Norte de Santander

Modelo	Nombre	Finca	Altura (msmn)	Coordenadas de ubicación	
				Longitud	Latitud
1	(NC-C-P)	El Zancudo	1248	73°18'52,71"W	8°18'42,61N
		El Caimito	1333	73°20'24,66"W	8°20'47,70"N
		El Porvenir	1195	73°21'55,07"W	8°19'04,45"N
2	(NC-A-F)	Villa Ángel	1252	73°20'50,85"W	8°20'11,20"N
		La Estrella	1234	73°20'24,66"W	8°20'47,70"N
3	(NC-A-M)	San Jacinto	1425	73°19'14,45W	8°19'57,15"N

Nota. NC-A-M: Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz; NC-C-P: Nogal Cafetero- Cacao-Plátano; NC-A-F: Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol. *Fuente:* Equipo investigador.

Una vez que se ubicaron las fincas, se procedió a abrir las seis minicalicatas o cajuelas rectangulares, las cuales tenían dimensiones de 40 a 50 cm de lado y una profundidad suficiente para permitir el estudio del horizonte B, o para describir los primeros 40 o 50 cm del perfil del suelo (Figura 2).

Figura 2

Observación del perfil del suelo en una minicalicata (cajuela)



Fuente: Equipo investigador.

Estas minicalicatas desempeñaron un papel fundamental al posibilitar la descripción de los perfiles de suelo en el campo, con el objetivo de lograr una caracterización preliminar tanto geomorfológica como edafológica. Este proceso se basó en la identificación del paisaje como punto de partida (Villota, 2005), considerando su morfología específica y añadiendo atributos como el material parental y la pendiente (Tabla 4) (Buol et al.,1981).

Tabla 4
Formulario de descripción de suelos del IGAC

Perfil N°			Tipo		
Taxonomía					
Unidad Cartográfica					Símbolo
Localización:	Departamento			Municipio	
Sitio					Altitud
Plancha N°			Aerofotografía N°		Vuelo
Coordenadas geográficas					
GEOMORFOLOGÍA		Paisaje		T. de Relieve	F. del terreno
Material	parental/		Litología		Grado de alteración
Relieve			Disección		Microrrelieve
PENDIENTE		Gradiente		Longitud	Forma
Clima ambiental (Caldas-lang)	_____				
Formación ecológica (Holdridge)	_____				
Temperatura promedio anual				anual	Precipitación promedio
Distribución de lluvias	_____				
CLIMA EDÁFICO	Régimen de temperatura				Régimen de humedad
DEGRADACIÓN	Clase _____		Tipo _____		
Erosión		Clase	Tipo		Grado
Evidencias de erosión	_____				
Movimientos en masa				Tipo	Frecuencia
AFLORAMIENTOS ROCOSOS	Clase				Superficie cubierta%
PEDREGOSIDAD SUPERFICIAL		Tipo		Clase	Superficie cubierta%
DRENAJES	Interno			Externo	Natural
NIVEL FREÁTICO		Naturaleza		Profundidad (cm)	
Inundaciones		Frecuencia		Duración	
Encharcamientos		Frecuencia		Duración	
Profundidad efectiva	Clase			Limitado por	
Profundidad (cm)	_____				
Cementación	Clase de agente				Grado

Grietas: Grosor (cm)			Longitud (cm)	
Plintita	Volumen		Fase	
Uso actual				
Limitantes del uso				
Clasificación por capacidad de uso		Clase	Subclase	
Vegetación natural				
Descrito por				
Características diagnósticas				
Observaciones				

Fuente: IGAC (2021)

En última instancia, empleando la información derivada tanto del paisaje geomorfológico como del tipo de relieve (Zinck, 1987), se procedió al llenado del formato destinado a la descripción de los horizontes identificados en el perfil del suelo. A partir de este conjunto de datos recopilados, se llevó a cabo la clasificación taxonómica de los suelos, llegando hasta la categoría de familia en consonancia con la clasificación textural dentro del subgrupo taxonómico (Tabla 5) (Soil Survey Staff, 2014).

Tabla 5

Formulario para la descripción de los horizontes

Horizontes	1	2	3	4	5	6
Características						
Profundidad (cm)						
Nomenclatura						
Epipedón						
Endopedón						
1º color matriz en seco						
2º color matriz en seco						
1º color matriz en húmedo						
2º color matriz en húmedo						

Horizontes	1	2	3	4	5	6
Características						
% observado						
MOTEADOS						
Color						
Cantidad (%observado)						
Tamaño						
Nitidez						
Textura						
Modificador de textura						

Fuente: IGAC (2021)

2.13. Caracterización fisicoquímica de los suelos

Con el fin de analizar el nivel de fertilidad de los suelos de las 15 fincas del municipio de Ocaña se procedió a hacer un muestreo de suelos entre los meses de marzo a abril de 2018, antes del establecimiento de los modelos. Para este caso, se tomaron muestras en las 30 ha (2 ha por finca) recolectando un total de 30 muestras destinadas a los análisis de fertilidad de los suelos. Para ello se tomaron muestras compuesta de suelos (15 a 20 muestras), dependiendo de la topografía del terreno en cada una de las dos parcelas de las 15 fincas seleccionadas hasta 30 cm de profundidad, se enviaron al Laboratorio Dr. Calderón (laboratorio de Bogotá) y se determinaron las siguientes variables:

En cada parcela seleccionada por finca, tanto para el modelo agroecológico como el testigo, se determinó el porcentaje de arcilla, limo y arena y se estableció la clasificación de la textura por el triángulo textural de USDA, asumido también por la FAO (IGAC, 2012). A las muestras de suelos se les realizaron las determinaciones para todas las variables químicas (macroelementos y microelementos) presentadas en la Tabla 6.

Tabla 6

Variables químicas y físicas de los suelos provenientes de 15 fincas en el municipio Ocaña, Norte de Santander

Variable	Unidades	Método	Referencia
pH		Potenciométrico en agua (2:1)	McLean (1982)
Conductividad eléctrica		Potenciométrico en agua (2:1)	Gee & Bauder (1986)
Macroelementos			
Potasio (K ⁺) Calcio (Ca ⁺²) Magnesio (Mg ⁺²) Sodio (Na ⁺) Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	(cmol(+)/kg)	Extracción con acetato de amonio 1M pH 7 y determinación por espectrofotometría de absorción atómica	Thomas (1982)
Fósforo (P)		Bray II	Bray & Kurtz (1954)
Azufre (S)	mg/kg	Extracción con Ca(HPO ₄)	Fox et al. (1964)
Amonio (N-NH ₄ ⁺)		Colorimétrico	Keeney & Nelson (1982)
Nitrato (N-NO ₃ ⁺)			
Microelementos			
Cloro (Cl)			
Hierro (Fe)	mg/kg	Olsen modificado	Hunter (1974)
Manganeso (Mn)			
Cobre (Cu)			
Zinc (Zn)			
Boro (B)		Azometina H	
Aluminio	(cmol(+)/kg)	Titulación	Gee & Bauder (1982),
Textura	%	Bouyoucos	Gee & Bauder (1986)

Fuente: Equipo investigador

2.14. Caracterización de la macrofauna del suelo

Para conocer la riqueza asociada al suelo en cada una de las fincas, se implementaron tres metodologías que permitieron conocer la arthropofauna en dos escalas y la microfauna, aportando al conocimiento de las dinámicas del suelo a diferentes escalas tróficas.

Para la realización del presente reporte se tomaron los datos del inventario de especies que hacen parte de la macrofauna del suelo del municipio de Ocaña, realizado en el mes de abril de 2018 en el marco de la caracterización biológica del suelo de las 15 fincas participantes, con un área de intervención de 2 ha cada uno, para un total de 30 ha en el municipio.

La recolección de macrofauna en cada una de las fincas se realizó por medio de levantamiento de tres monolitos de 30 cm de largo por 30 cm ancho y 30 cm de profundidad (Figura 3), estos se tomaron con ayuda del palín, lo cual permite tener una mayor facilidad a la hora de sacar la muestra para su revisión, para un total de 45 monolitos en todo el municipio de Ocaña.

Figura 3

Dimensiones y apertura de monolito 30 x 30 x 30 para análisis de macrofauna



Fuente: Equipo investigador

Se seleccionaron los monolitos de manera aleatoria en cada una de las fincas, garantizando la cobertura de las áreas más representativas. En cada uno de estos monolitos, se llevó a cabo la recolección de fauna de manera segmentada. Se examinaron fragmentos de aproximadamente 10 cm del monolito con lupa, colocándolos en bandejas de color blanco. Esta elección de fondo resalta los artrópodos, anélidos y otros

grupos taxonómicos encontrados, facilitando su extracción con pinzas entomológicas. Cada individuo capturado se preservó en frascos con tapa de rosca, contenidos de alcohol al 70 %. Estos frascos se etiquetaron y marcaron adecuadamente para garantizar la integridad de los datos destinados a las futuras identificaciones taxonómicas y análisis estadísticos (véase Figuras 4a y 4b).

Figura 4

Recolección de la macrofauna del suelo



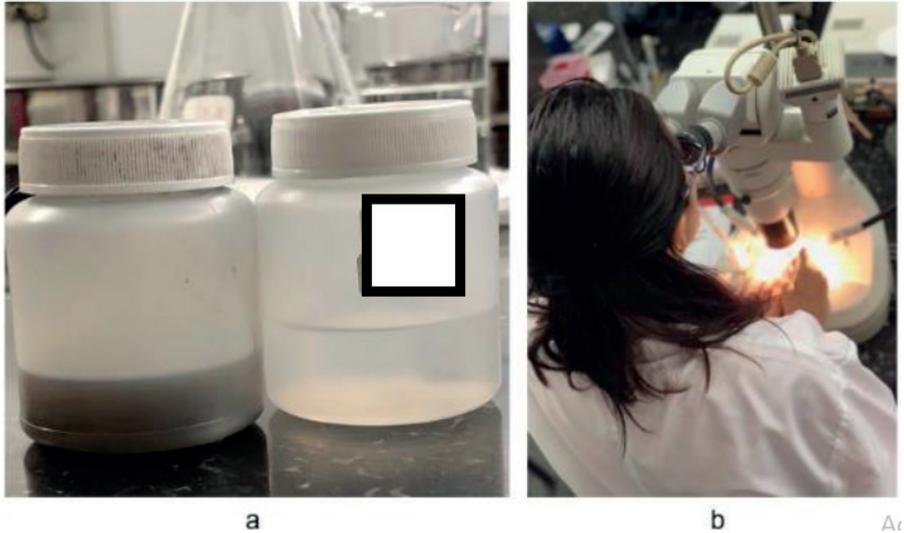
Nota. a) Búsqueda de macrofauna b) Etiquetas papel apergaminado en frasco tipo rosca con alcohol al 70 % e información de georreferenciación de la recolecta. *Fuente:* Equipo investigador

Después de la recolección, se inspeccionó minuciosamente el material biológico. En caso de que los ejemplares recolectados presentaran tierra u otros materiales orgánicos deteriorantes, se llevó a cabo un cambio de alcohol (Figura 5a) para prevenir su deterioro. Estas muestras se sometieron a una revisión detallada por parte del taxónomo, quien determinó la clasificación taxonómica precisa, llegando incluso a la categoría más específica posible. Para llevar a cabo este proceso, se utilizó un estereoscopio y se emplearon claves dicotómicas, como las proporcionadas por Carvalho (1972) para Miridos, Mound & Geoffrey (1998) para Thysanoptera, Amett & Thomas (2000) y Castañeda-Vildosola et al. (2007) para Coleoptera. También se hizo uso de

Triplehorn & Johnson (2005) para corroborar y clasificar los demás individuos recolectados (Figura 5b).

Figura 5

Identificación de la macrofauna del suelo



Nota. a) Cambio de alcohol - preservación de muestras b) identificación de muestras recolectadas. *Fuente:* Equipo investigador

Para analizar los patrones de distribución de las especies identificadas en cada finca, se desarrollaron curvas que representan el rango de abundancia. A continuación, empleando los datos de abundancia y diversidad, se calcularon varios de los índices de biodiversidad correspondientes a las especies arbóreas, los cuales fueron propuestos por Moreno (2001) y son ampliamente empleados en investigaciones sobre diversidad y composición florística según otros autores (por ejemplo, Zarco-Espinoza et al., 2010; Morales-Salazar et al., 2015; Melo et al., 2017; Sardi et al., 2018). Los índices estudiados en las muestras obtenidas fueron:

- Índice de riqueza específica: S
- Índice de diversidad de especies de Margalef= $D_{Mg} = (S-1) / \ln(N)$.
- Índice de equidad de abundancia: (Shannon-Wiener) $H' = - \sum (p_i) \ln(p_i)$
- Índice de dominancia de Simpson $D = \sum p_i^2$

Donde:

N= número total de individuos de todas las especies.

S= número de especies identificadas.

p_i = proporción de la abundancia de una especie i, en relación con el total de individuos de todas las especies.

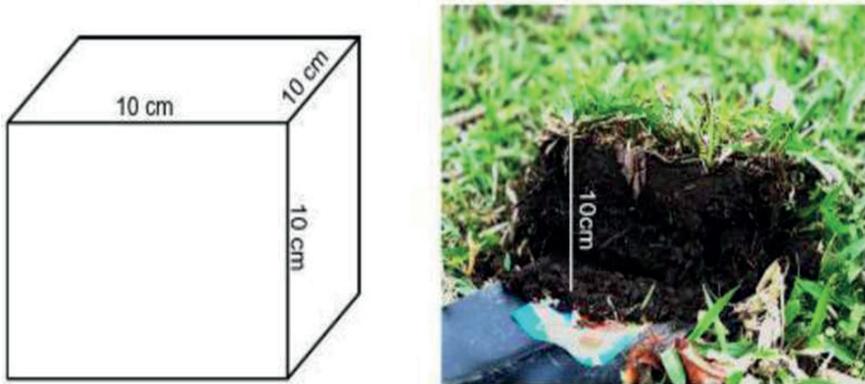
Se realizó un análisis de estadística descriptiva y distribución de los datos de las variables para luego realizar análisis de clasificación automática de las fincas según las cinco variables determinadas; abundancia, riqueza, diversidad, equidad y dominancia utilizando el paquete SPSS.

2.15. Caracterización de la mesofauna del suelo

Con el propósito de investigar la mesofauna presente en cada finca, se seleccionaron al azar un par de monolitos con dimensiones de 10 cm de largo, 10 cm de ancho y 10 cm de profundidad. En total, se recolectaron 30 de estos monolitos en el municipio, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Dimensiones y apertura de monolito 10 cm x 10 cm x 10 cm para mesofauna



Fuente: Equipo investigador

Cada muestra fue depositada en una bolsa ziplock y posteriormente marcada y etiquetada con los datos correspondientes a la finca. Luego, se introdujeron las muestras en embudos de Berlese-Tyllgren durante un período de 72 horas. Este proceso permitió que los artrópodos presentes en las muestras migraran hacia la parte inferior del embudo debido al aumento de temperatura y luz en la parte superior, generados por bombillas de 40W (Figura 7a). Los artrópodos que descendieron fueron recolectados en frascos de vidrio con tapa de rosca conteniendo alcohol al 70 % (Figura 7b). Después de las 72 horas, cada frasco fue etiquetado con los datos correspondientes a la finca y se llevó a cabo un proceso de sistematización.

La identificación de las especies se llevó a cabo utilizando claves dicotómicas proporcionadas por Krantz & Walter (2009) para ácaros. Se logró identificar los arácnidos a nivel taxonómico de orden, como Cryptostigmata u Oribatida, Astigmata, Prostigmata y Mesostigmata. Para identificar los Collembola, se empleó la clave de Díaz et al. (2004).

Figura 7
Recolección de la mesofauna del suelo



Fuente: Equipo investigador

Para analizar los patrones de distribución de las especies halladas en cada finca, se construyeron curvas que representan el rango de abundancia. Posteriormente, utilizando los datos de abundancia y riqueza, se calcularon diversos índices de biodiversidad correspondientes a las especies arbóreas. Estos índices fueron propuestos por Moreno (2001) y son ampliamente utilizados en investigaciones sobre diversidad y composición florística, como ejemplifican los estudios de Zarco-Espinoza et al., (2010), Mora et al., (2013), Morales-Salazar et al., (2015), Medrano & Hernández, Melo et al. (2017) y Sardi et al., (2018).

Los índices estudiados en las muestras obtenidas son:

- Índice de riqueza específica: S
- Índice de diversidad de especies de Margalef= $DMg = (S-1)/ \ln(N)$.
- Índice de equidad de abundancia: (Shannon-Wiener) $H' = - \sum (p_i) \ln(p_i)$
- Índice de dominancia de Simpson $D = \sum p_i^2$

Donde:

N= número total de individuos de todas las especies.

S= número de especies identificadas.

p_i = proporción de la abundancia de una especie i , en relación con el total de individuos de todas las especies.

Se realizó un análisis de estadística descriptiva y distribución de los datos de las variables para luego realizar el análisis de clasificación automática de las fincas según las cinco variables determinadas; abundancia, riqueza, diversidad, equidad y dominancia utilizando el paquete SPSS.

2.16. Caracterización de la microfauna del suelo

En el presente estudio se recolectó suelo, tomando en la finca 10 puntos al azar, en los cuales se recolectaron 10 submuestras (100 g) cerca de la zona de gotera de las plantas más dominantes, cada muestra se tomó a una profundidad de 20 cm y posteriormente se depositó en un recipiente de plástico, con el fin de homogenizar las submuestras y tomar una muestra de 500 g representativa de la microfauna de la finca. Las muestras fueron transportadas al laboratorio en una caja aislada y almacenadas a 4°C para posteriormente hacer su extracción.

2.17. Obtención de nematodos

La muestra de suelo se mezcló completamente y se tomó una submuestra de 100 g, la cual se vació en un vaso de precipitado conteniendo 2 L de ADE (agua destilada estéril); se agitó durante 30 segundos y se dejó reposar otros 2 minutos para que las partículas del suelo se sedimentaran. Esta suspensión se pasó a través de tamices de 350 a 250 μm , y los nematodos se colectaron directamente en un tamiz de 37 μm (Figura 10a). Finalmente, se obtuvo una suspensión la cual se utilizó para realizar el método modificado de extracción de nemátodos a través de centrifugación y flotación con azúcar (Jenkins, 1964).

En este procedimiento, la suspensión se centrifugó a 3.500 rpm durante 5 minutos y luego se descartó el sobrenadante. Posteriormente, el sedimentoso se suspendió en una solución de sacarosa en una proporción 1:1 y se centrifugó de nuevo a 1,000 rpm durante dos minutos; los

nematodos se colectaron a partir del sobrenadante utilizando un tamiz de 37 μm (Figura 8b). Los especímenes que se hallaron sobre la malla se lavaron y arrastraron con ADE, y luego se colectaron en una caja de Petri (Figura 8a). La suspensión, contenida en el vaso, se distribuyó en tubos de ensayo para su análisis e identificación.

Figura 8

Recolección de los nemátodos del suelo



Nota. a) Tamices de 350 μm , 250 μm y 100 μm . b) Colecta de nemátodos en cajas de Petri para su identificación. *Fuente:* Equipo investigador

2.18. Obtención de Protozoarios

Para la obtención de los protozoarios se utilizaron tres frascos esterilizados que contenían ADE. En cada uno de estos frascos, se añadieron 50 g de suelo proveniente de la finca. Posteriormente, se agitó enérgicamente para lograr una homogeneización completa de la solución. Esta mezcla se dejó reposar durante un período de tres días. Tras transcurrido este lapso, se extrajo una pequeña gota del líquido sobrenadante. Dicha gota fue colocada sobre una lámina portaobjetos, donde se procedió a registrar tanto la cantidad como el tipo de protozoarios presentes en la muestra.

2.19. Obtención de Turbelarios y Rotíferos

Teniendo en cuenta su hábitat acuático se tomaron 50 g de suelo y se homogenizaron con 500 mL de ADE, se licuaron por 5 segundos y se pasó la solución por los tamices de 2000 μm , 1000 μm , 450 μm y 300 μm . Finalmente se colocó la solución resultante en cajas de Petri y se visualizaron directamente al estereoscopio y al microscopio.

2.20. Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre las variables químicas y biológicas del suelo

Para determinar la influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre las variables fisicoquímicas del suelo, se tomaron muestras de suelo un año después del establecimiento de los modelos agroecológicos y se hicieron los mismos análisis de laboratorio siguiendo los aspectos señalados en la sección de caracterización taxonómica y agroquímica de los suelos.

Para la determinación de la influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre las variables biológicas del suelo, se realizó un segundo muestro después de establecidos los cultivos en cada uno de los modelos, siguiendo la misma metodología descrita previamente. La información obtenida, se comparó con el primer muestreo en lo relacionado con los siguientes índices de biodiversidad o variables por finca y municipio:

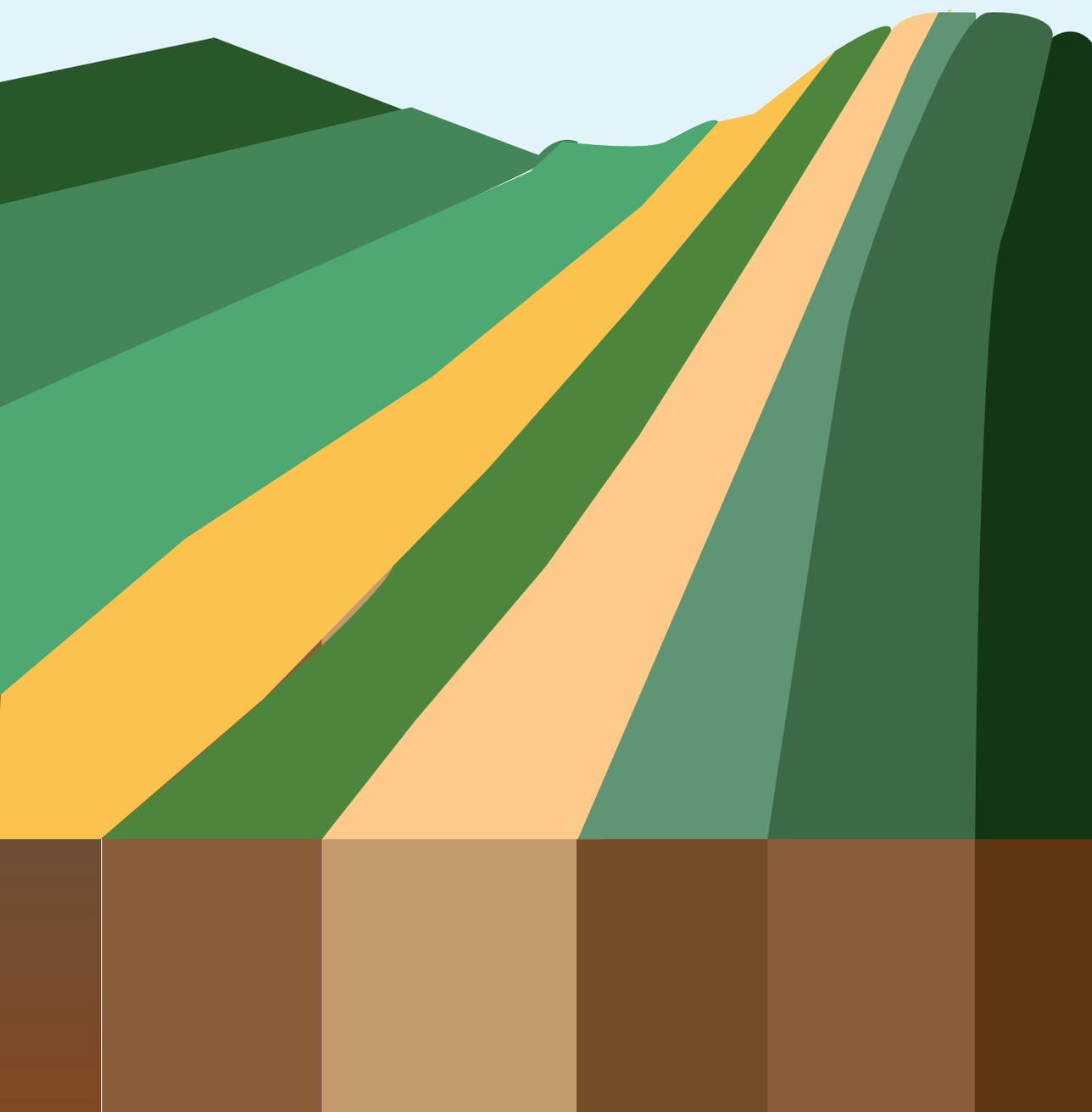
Se recopiló toda la información desde que se seleccionó cada parcela sobre las prácticas agroecológicas implementadas desde antes de la siembra o plantación, durante la siembra y posterior durante el desarrollo del cultivo. Se realizaron comparaciones a través de tablas resúmenes y gráficos entre las parcelas agroecológicas y las testigos, así como entre los modelos agroecológicos. Esta información se empleó también para discutir el desarrollo de los cultivos y la repercusión sobre la incidencia de plagas y enfermedades.

2.21. Análisis estadístico

Los datos de las variables químicas, físicas y biológicas de los suelos en las 15 fincas estudiadas fueron sometidos a estadística descriptiva

donde determinó la media, valores mínimo y máximo, coeficiente de variación, coeficiente de variación y error estándar tanto antes como posterior a la implementación de los modelos. Para evaluar el efecto de la implementación de los modelos agroecológicos se aplicó un análisis de la varianza de una vía, cuando este fue significativo ($p < 0,05$). Se empleó el método de muestras no pareadas por la prueba de t de Student con una probabilidad de error del 5 %. Para analizar la abundancia, riqueza específica e índices de diversidad, equidad, dominancia de la macrofauna, mesofauna y microfauna de los suelos se realizó un análisis de conglomerados y dendogramas de cada una de las variables evaluadas. Se utilizó el paquete estadístico SPSS versión 21.

CAPÍTULO III
**RESULTADOS
Y ANÁLISIS**



CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización taxonómica de los suelos

De acuerdo con la clasificación taxonómica realizada, los suelos descritos en cinco de las fincas pertenecen al orden Inceptisol y en una sola finca se encontró que los suelos pertenecen al orden Entisol. Los regímenes de humedad encontrados fueron Údico y Ústico (Tabla 7).

Tabla 7

Distribución de los modelos agroecológicos y perfiles de suelos de las fincas

Modelo	Finca	Coordenadas de ubicación		Clasificación taxonómica del suelo
		Longitud	Latitud	
NC-C-P	El Zancudo	73°18'52,71"W	8°18'42,61N	Typic Dystrudepts franco fino
NC-C-P	El Caimito	73°20'24,66"W	8°20'47,70"N	Typic Dystrudepts fino sobre fragmental
NC-C-P	El Porvenir	73°21'55,07"W	8°19'04,45"N	Typic Ustorthents franco fino
NC-A-F	Villa Ángel	73°20'50,85"W	8°20'11,20"N	Typic Dystrustepts fino
NC-A-F	La Estrella	73°20'24,66"W	8°20'47,70"N	Typic Dystrustepts fragmental
NC-A-M	San Jacinto	73°19'14,45W	8°19'57,15"N	Typic Dystrudepts muy fino

Nota. NC-A-M: Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz; NC-C-P: Nogal Cafetero-Cacao-Plátano; NC-A-F: Nogal cafetero-Aguacate-Frijol. *Fuente:* Equipo investigador

El conocimiento de la caracterización taxonómica en el municipio de Ocaña es fundamental para hacer una correcta planeación de uso del suelo, así como para evaluar los efectos del tipo de manejo sobre las

propiedades físicas y químicas de estos, de manera que se pueda ofrecer un manejo sostenible que permita mantener la productividad y que redunde en un mejor ingreso económico de los productores.

Los inceptisoles son suelos bastante jóvenes todavía en evolución con un grado de desarrollo incipiente. Suelen estar presentes en ecosistemas forestales, terrenos agrícolas y praderas, siendo las zonas forestales donde se encuentran con mayor frecuencia. De igual forma, es común encontrarlos en zonas montañosas con pendientes abruptas tal como ocurre en las zonas de Ocaña, en donde fueron descritos los perfiles, esto debido a que la erosión del suelo continuamente elimina la parte superficial del terreno.

Un régimen de humedad údico indica que el suelo no está seco por un período tan largo como 90 días acumulados en la mayoría de los años. Se encuentran comúnmente en climas húmedos con buena distribución de la precipitación buena disponibilidad de agua para las plantas la mayor parte del año. En estos casos, pueden existir pérdidas importantes de calcio, magnesio, potasio, entre otros elementos con tendencia a ser ácidos e infértiles (Soil Survey Staff, 2014).

Los entisoles por su parte, son suelos de reciente formación que se desarrollan en áreas donde la tasa de deposición o erosión son más rápidas que la tasa de desarrollo del suelo, con frecuencia predominan las fracciones gruesas y un desarrollo estructural incipiente (Soil Survey Staff, 2014). En un régimen de humedad ústico indica que el suelo está seco en alguna o todas sus partes durante más de 90 días acumulados en la mayoría de los años. Desde el punto de vista productivo, se puede obtener un cultivo de ciclo corto y a salidas de agua se siembra otro cultivo menos exigente en agua el cual se cosecha en el período seco. En cultivos de plantación es necesario regar durante más o menos seis meses (Soil Survey Staff, 2014).

3.1.1 Clasificación taxonómica de los suelos

3.1.1.1 Perfil de suelo finca El Zancudo

De acuerdo con el levantamiento de la información de la finca El Zancudo, en la cual se implementó el modelo agroecológico Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P), el suelo fue clasificado taxonómicamente como un *Typic Dystrudepts* franco fino, con una fertilidad natural baja. Gran parte del paisaje donde se encuentra este suelo es un

bosque natural intervenido, en un clima húmedo seco, con una altitud promedio de 1200 m, dentro de un paisaje montañoso de filas y vigas desarrollado sobre granitos y gneis, caracterizado por procesos morfo-dinámicos activos: soliflucción generalizada en grado moderado y en ciertos sectores deslizamientos; fuertes pendientes, generalmente mayores del 50 % (Tabla 8).

Tabla 8

Descripción del perfil de suelo en la finca El Zancudo

<p>Unidad climática: Subhúmedo seco. Paisaje: Lomerío. Coordenadas: Latitud: 73°18'52,71"W Longitud: 8°18'42,61N Finca El Zancudo; propietario Martiniano Sepúlveda. Clasificación taxonómica: <i>Typic Dystrudepts</i> francoso fino.</p>		
	<p>Ap 0-15,5 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo oscuro (7,5YR 3/3); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, finos y medios, moderados; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; muchos poros medios y finos; muchas raíces medias y finas; mucha actividad de macroorganismos.</p>
	<p>A2 15,5-35 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo muy oscuro (7,5YR 2.5/3) con 20% de moteados de color pardo (7,5YR 4/4); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y finos, moderados; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; frecuentes poros finos; pocos fragmentos de roca, tipo cascajo; muchas raíces finas; frecuente actividad de macroorganismos.</p>
	<p>Bw 135-50 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo (7,5YR 4/4); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, finos y medios; moderados; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; frecuentes poros finos; pocos fragmentos de roca, tipo gravilla; frecuentes raíces finas; poca actividad de macroorganismos.</p>
	<p>Bw2 50-100X cm</p>	<p>Color en húmedo rojo amarillento (5YR 5/8); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios; débiles; consistencia en húmedo firme, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; pocos poros finos; no hay raíces; no hay actividad de macroorganismos.</p>

Fuente: Equipo investigador

3.1.1.2 Perfil de suelo de la finca El Caimito

El suelo en esta finca fue clasificado taxonómicamente como un *Typic Dystrudepts* francoso fino sobre fragmentos de roca. En relación con el tipo de vegetación presente, en la finca se encontraron cultivos de maíz, yuca y plátano los cuales fueron establecidos aproximadamente hace 10 años; además, fueron identificados varios sectores en bosque secundario y en sucesión natural.

La finca se encuentra en un clima subhúmedo seco, con una altitud promedio de 1200 m, dentro de un paisaje montañoso de filas y vigas desarrollado sobre granitos y gneis, caracterizado por procesos morfo-dinámicos activos: soliflucción generalizada en grado moderado y en ciertos sectores deslizamientos; fuertes pendientes, generalmente mayores del 50 %. Los suelos son profundos limitados por fragmentos de roca, texturas finas y gruesas y fertilidad natural baja (Tabla 9).

Tabla 9

Descripción del perfil de suelo ubicado en la finca El Caimito

<p>Unidad climática: Subhúmedo seco. Paisaje: Montaña. Coordenadas: Latitud: 8°20'47,70"N Longitud: 73°20'24,66"W Clasificación taxonómica: <i>Typic Dystrudepts</i> francoso fino sobre fragmental.</p>		
	<p>Ap 0-38 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo oliva (2,5Y 4/4); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos, débiles; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; muchos poros medios y finos; pocos fragmentos de roca, tipo gravilla; muchas raíces medias y finas; mucha actividad de macroorganismos.</p>
	<p>Bw1 38-58 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo (7,5YR 5/2); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos, débiles; frecuentes fragmentos de roca, tipo cascajo; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; frecuentes poros finos; frecuentes fragmentos de roca, tipo cascajo; muchas raíces finas; frecuente actividad de macroorganismos.</p>

	<p>Bw2 58-76 cm</p>	<p>Color en húmedo gris oliva (5Y 5/2); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos, débiles; muchos fragmentos de roca, tipo piedra; moderados; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica; pocos poros finos; no hay raíces; no hay actividad de macroorganismos.</p>
	<p>BC 76-100 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo rojizo (5YR 4/4); textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares, medios; muchos fragmentos de roca, tipo piedra; moderados; consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa y no plástica; pocos poros finos; no hay raíces; no hay actividad de macroorganismos.</p>

Fuente: Equipo investigador

3.1.1.3 Perfil de suelo finca El Porvenir

El suelo en esta finca fue clasificado taxonómicamente como un *Typic Ustorthents* francoso fino. La finca se encuentra en un clima medio seco, con una altitud aproximada de 1400 m, dentro de un paisaje de lomerío en el cual su principal tipo de relieve corresponde a las lomas, las cuales se han desarrollado sobre granitos y conglomerados. En este paisaje es posible identificar procesos de escurrimiento difuso y concentrado en grado severo; además, se caracteriza por fuertes pendientes que oscilan entre el 25 y el 50 %. Los suelos son muy superficiales limitados por fragmentos de roca, texturas finas y fertilidad natural baja (Tabla 10).

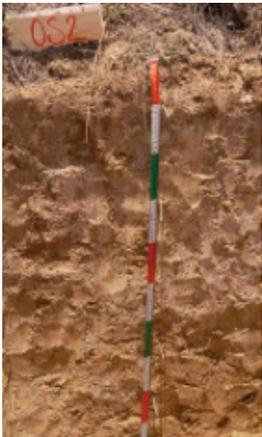
Por las características de precipitación y clima seco son muy pocas las actividades agrícolas en esta finca; su principal cobertura lo constituyen los pastos para la ganadería de tipo extensivo, aproximadamente de 11 años de establecidos.

Las bajas condiciones de precipitación (clima seco) se constituyen en una verdadera limitante para los sistemas de producción propuestos: cacao y plátano, se hace necesario implementar un sistema de riego supletorio que permita el establecimiento y normal desarrollo de estos dos cultivos. La profundidad efectiva de estos suelos no constituye tampoco una limitante para la penetración de las raíces, es especial del cacao; pero un aspecto muy relevante y que se debe tener en cuenta es adelantar planes de fertilización y abonamiento para el desarrollo de los cultivos propuestos.

Las bajas condiciones de precipitación (clima seco) se constituyen en una verdadera limitante para los sistemas de producción propuestos: cacao y plátano, se hace necesario implementar un sistema de riego supletorio que permita el establecimiento y normal desarrollo de estos dos cultivos. La profundidad efectiva de estos suelos no constituye tampoco una limitante para la penetración de las raíces, es especial del cacao; pero un aspecto muy relevante y que se debe tener en cuenta es adelantar planes de fertilización y abonamiento para el desarrollo de los cultivos propuestos.

Tabla 10

Descripción del perfil de suelo ubicado en la finca El Porvenir

<p>Unidad climática: Subhúmedo seco. Paisaje: Lomerío. Coordenadas: Latitud: 8°19'04,45"N Longitud: 73°21'55,07"W Clasificación taxonómica: <i>Typic Ustorthents</i> francoso fino.</p>		
 	<p>Ap 0-10 cm</p>	<p>Color en húmedo rojo amarillento (5YR 5/6); textura franca arcillo arenosa; estructura en bloques subangulares, finos, débiles; consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa y no plástica; frecuentes poros medios y finos; muchas raíces medias y finas; frecuentes fragmentos de roca, tipo gravilla; mucha actividad de macroorganismos.</p>
	<p>C1 10-30 cm</p>	<p>Color en húmedo rojo amarillento (5YR 5/8); textura franca arcillo arenosa; sin estructura, masiva; consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa y no plástica; pocos poros muy finos; muchos fragmentos de roca, tipo cascajo; muchas raíces finas; frecuente actividad de macroorganismos.</p>
	<p>C2 30-67,5 cm</p>	<p>Color en húmedo amarillo rojizo (7,5YR 7/8); textura franca arcillo arenosa; sin estructura, masiva; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica; muchos poros finos; muchos fragmentos de roca, tipo cascajo; frecuentes raíces finas; poca actividad de macroorganismos.</p>
	<p>C3 67,5-100 cm</p>	<p>Color en húmedo amarillo rojizo (7,5YR 7/8); textura franco arcillo arenosa; sin estructura, masiva; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; muchos poros finos; muchos fragmentos de roca, tipo cascajo; frecuentes raíces finas; poca actividad de macroorganismos.</p>

Fuente: Equipo investigador

3.1.1.4 Perfil de suelo finca Villa Ángel

El suelo descrito en esta finca fue clasificado taxonómicamente como un *Typic Dystrudepts* fino, muy profundo y de fertilidad natural baja. La finca se encuentra en un clima medio seco, con una altitud aproximada de 1240 msnm, dentro de un paisaje de lomerío en el cual su principal tipo de relieve corresponde a las lomas, las cuales se han desarrollado sobre granitos y conglomerados.

En este paisaje es posible identificar procesos de escurrimiento difuso en grado ligero; además, se caracteriza por pendientes que oscilan entre el 25 y el 50 %. Para la selección de los sitios del establecimiento de los diferentes sistemas productivos (cacao-plátano) se debe tener en cuenta la pendiente, ya que estos suelos presentan una alta susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa, es decir, se deben seleccionar aquellas áreas con menor pendiente y en lo posible que no tengan procesos de remoción activos, especialmente en el establecimiento de árboles. Por otro lado, es indispensable las prácticas de fertilización y abonamiento por la baja oferta nutricional de este suelo (Tabla 11).

Tabla 11

Descripción del perfil de suelo ubicado en la finca Villa Ángel

<p>Unidad climática: Subhúmedo seco. Paisaje: Lomerío. Coordenadas: Latitud: 73°20'50,85"W Longitud: 8°20'11,20"N Clasificación taxonómica: <i>Typic Dystrudepts</i> fino.</p>		
	<p>Ap 0-13 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y finos, moderados; consistencia en húmedo friable; en mojado muy pegajosa y muy plástica; frecuentes poros finos; muchas raíces medias y finas; frecuente actividad de macroorganismos.</p>
	<p>Bw1 13-26 cm</p>	<p>Color en húmedo gris rosáceo (5YR 6/2); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, gruesos, débiles; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; frecuentes poros finos; muchas raíces finas; no hay actividad de macroorganismos.</p>

	<p>Bw2 26-100 cm</p>	<p>Color en húmedo amarillo rojizo (7,5YR 7/6); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, gruesos; débiles; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; muchos poros finos; frecuentes raíces finas; no hay actividad de macroorganismos.</p>
---	--------------------------	---

Fuente: Equipo investigador

3.1.1.5 Perfil de suelo finca La Estrella

De acuerdo con la descripción taxonómica este suelo fue clasificado como un *Typic Dystrustepts* fragmental. La finca se encuentra en un clima medio seco, con una altitud aproximada de 1250 m, dentro de un paisaje de lomerío en el cual su principal tipo de relieve corresponde a las lomas, las cuales se han desarrollado sobre granitos y conglomerados. En este paisaje es posible identificar procesos de escurrimiento difuso y concentrado en grado severo; además, se caracteriza por fuertes pendientes que oscilan entre el 25 y el 50%. Los suelos son superficiales limitados por fragmentos de roca, texturas finas y fertilidad natural baja (Tabla 12).

Tabla 12

Descripción del perfil de suelo ubicado en la finca La Estrella

<p>Unidad climática: Subhúmedo seco. Paisaje: Lomerío. Coordenadas: Latitud: 73°20'24,66"W Longitud: 8°20'47,70"N Clasificación taxonómica: <i>Typic Dystrustepts</i> fragmental.</p>		
	<p>Ap 0-20 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo (7,5YR 5/4); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos débiles; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y plástica; frecuentes poros medios y finos; frecuentes fragmentos de roca, tipo cascajo; muchas raíces medias y finas; frecuente actividad de macroorganismos.</p>
<p>Bw 120-35 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo (7,5YR 4/4); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos, débiles; consistencia en húmedo friable, en mojado muy pegajosa y muy plástica; frecuentes poros finos; frecuentes fragmentos de roca, tipo cascajo; muchas raíces finas; poca actividad de macroorganismos.</p>	

	<p>Bw2 35-100X cm</p>	<p>Color en húmedo pardo fuerte (7,5YR4/6); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos débiles; moderados; consistencia en húmedo friable, en mojado muy pegajosa y muy plástica; muchos poros finos; muchos fragmentos de roca, tipo cascajo; no hay raíces; no hay actividad de macroorganismos.</p>
---	---------------------------	--

Fuente: Equipo investigador

La principal limitante para el establecimiento de los sistemas productivos lo constituye el clima por su escasa precipitación; además los fragmentos de roca y los procesos erosivos se constituyen en verdaderas limitaciones para el establecimiento de árboles; otro aspecto que reviste mucha importancia es la fertilidad natural, por tal razón, es indispensable adelantar planes de fertilización y abonamiento.

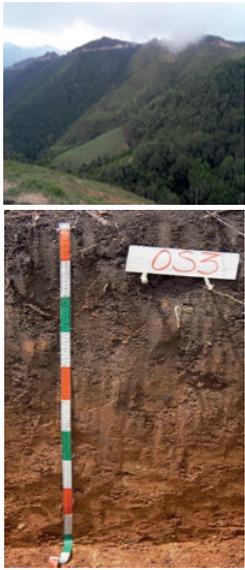
Además, es importante tener en cuenta que, para la selección de los sitios del establecimiento de los diferentes sistemas productivos (cacao-plátano) se tenga en cuenta la pendiente, ya que estos suelos presentan una alta susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa.

3.1.1.6 Perfil de suelo finca San Jacinto

El suelo fue clasificado taxonómicamente como un Typic Dystrudepts muy fino, profundo, limitado por un contacto lítico, texturas finas y fertilidad natural baja. Las fincas se encuentran en un clima medio húmedo, con una altitud promedio de 1350 m, dentro de un paisaje montañoso de filas y vigas desarrollado sobre granitos y gneis, caracterizado por procesos morfodinámicos activos: soliflucción generalizada en grado moderado y en ciertos sectores deslizamientos; fuertes pendientes, generalmente mayores del 50 % (Tabla 13)

Tabla 13

Descripción del perfil de suelo ubicado en la finca San Jacinto

<p>Unidad climática: Subhúmedo húmedo. Paisaje: Montaña. Coordenadas: Latitud: 73°19'14,45W Longitud: 8°19'57,15"N Clasificación taxonómica: <i>Typic Dystrustepts</i> muy fino.</p>		
	<p>Ap 0-22 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios, moderados; consistencia en húmedo firme, en mojado pegajosa y plástica; muchos poros finos; muchas raíces medias y finas; mucha actividad de macroorganismos.</p>
	<p>AB 22-41 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) con 30% de moteados de color pardo fuerte (7,5YR 5/6); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos, moderados; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; frecuentes poros finos; frecuentes raíces finas; frecuente actividad de macroorganismos.</p>
	<p>Bw1 41-65 cm</p>	<p>Color en húmedo pardo oscuro (7,5YR 3/4) con 30% de moteados de color pardo fuerte (7,5YR 5/6); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos; moderados; consistencia en húmedo friable, en mojado muy pegajosa y plástica; muchos poros finos; pocas raíces finas; no hay actividad de macroorganismos.</p>
	<p>Bw2 65-100 cm</p>	<p>Color en húmedo rojo (2,5YR 5/6); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos; moderados; consistencia en húmedo friable, en mojado muy pegajosa y plástica; muchos poros finos; frecuentes raíces finas; no hay actividad de macroorganismos.</p>

Fuente: Equipo investigador

Por los sistemas de producción propuestos y la susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa, reviste mucha importancia las prácticas culturales para el manejo y control de la erosión; para el establecimiento del sistema agroecológicos, es indispensable el establecimiento de los cultivos en sentido contrario a la pendiente, se debe mantener el suelo con algún tipo de cobertura vegetal para evitar la escorrentía y arrastre de sedimentos, evitar la ganadería. Por otro lado, son indispensable las prácticas de fertilización y abonamiento por la baja oferta nutricional de este suelo.

Para establecer la relación paisaje-suelo en el municipio de Ocaña, posteriormente al trabajo de campo, se logró establecer porciones tridimensionales de la superficie terrestre, las cuales fueron descritas en términos de unas mismas características climáticas, morfológicas, de material parental y de edad, dentro de las cuales se encontró una alta homogeneidad edáfica, así como una cobertura vegetal o un uso de la tierra similares (IGAC, 2007).

En este sentido, las fincas caracterizadas se encuentran en climas medio húmedo y medio seco, dentro de los paisajes de montaña y lomerío y a los cuales corresponden los tipos de relieve de filas y vigas y lomas, respectivamente; a esta morfología específica se le adicionan como atributos el material parental y la pendiente. Estos tipos de relieve se caracterizan por pendientes fuertes a medias y erosión laminar ligera a moderada, en los que la principal limitante lo constituye la presencia o no de fragmentos de roca y la baja fertilidad natural.

Con el fin de evaluar de forma puntual procesos y tecnologías utilizadas ante la posibilidad de generar alteraciones de los recursos naturales (agua, suelo), se realizó un análisis integrado de las características climáticas y de los paisajes, necesario para identificar la capacidad de uso de las tierras y los requerimientos de cada uno de los sistemas agroecológicos a establecer; ya que dentro del proceso de establecimiento y la planificación del uso de la tierra, los estudios de suelos permiten determinar su oferta y con ella la potencialidad de establecimiento de uno u otro sistema agroecológico, y así definir directrices básicas en los procesos de establecimiento productivo (Pound, 2003).

Cabe señalar que, la oferta ambiental está en función de las diferencias edáficas en cada una de las fincas estudiadas según la posición geográfica, la estabilidad de suelos, las características fisicoquímicas y capacidad de uso, llegando a impactar los recursos naturales renovables en el municipio y los sistemas agroforestales a implementar (IGAC, 2007).

Finalmente, es indispensable ajustar varios aspectos referentes al papel del suelo en los procesos de planificación y/o verdadera vocación y de esta manera, poder establecer sistemas de producción que permitan un manejo óptimo del recurso tierra; para ello, se requiere un enfoque integral al manejo de temas referentes al uso, manejo y conservación del suelo, aclarando el papel del establecimiento de sistemas agroecológicos respecto a los impactos políticos, económicos y

culturales que plantea un reto serio (Pound, 2003).

3.2 Caracterización fisicoquímica de los suelos

De acuerdo con la comparación de los valores obtenidos en las variables químicas de los suelos con datos de referencia, se encontró que el 50 % de las fincas presentaron suelos con un alto porcentaje de deficiencia en el P, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, S, Fe y B (Tabla 14).

Tabla 14

Porcentaje de las fincas con valores de nutrientes catalogados como deficiente y bajos

Porcentaje de fincas con niveles	K	Ca	Mg	Na	Al	P	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	(cmol(+)/kg)					ppm								
Deficiente	16,7	20,0	36,7	66,7	0,0	66,7	30,0	83,3	83,3	60,0	26,7	40,0	43,3	83,3
Bajo	53,3	23,3	13,3	6,7	53,3	6,7	33,3	6,7	6,7	30,0	16,7	56,7	13,3	13,3

Nota. potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; P: fósforo; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro.

Fuente: Equipo investigador

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 15 es importante destacar que el 93,3 % de las fincas presenta suelos con bajo porcentaje de materia orgánica, mientras que el 33,3% de los suelos presentaron pH bajo.

Tabla 15

Porcentaje de las fincas con valores de pH, conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico, saturación de humedad y capacidad de intercambio catiónico (CIC) que han sido catalogados de deficiente y bajo

Porcentaje de fincas con niveles	pH	CE mS/cm	CO %	Saturación Humedad %	CIC (cmol(+)/kg)
Deficiente	3,3	86,6	0	0	0
Bajo	33,3	6,66	93,3	0	26,7

Nota. pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; CO: carbono orgánico; CIC: capacidad de intercambio catiónico. *Fuente:* Equipo investigador

Es importante destacar que los macroelementos presentaron una variabilidad espacial muy alta, la cual se ve reflejada en la enorme diferencia entre el valor mínimo y el valor máximo y el alto valor del coeficiente de variación (CV), por encima del 80 %, observado para cada una de las variables químicas de los suelos. El CV más alto se observó en el K (140 %) (Tabla 16).

Tabla 16

Valores promedio, máximo y mínimo de los macroelementos presentes en los suelos de las fincas estudiadas en el municipio Ocaña, Norte de Santander

Estadísticos descriptivos	N-NH ⁺	N-NO ⁻	P	Mg	S	K	Ca	CIC
	ppm			cmol(+)/kg				
Media	26,8	85,2	76,2	40,3	50,4	31,2	32,8	22,30
Mínimo	2	4,6	1	0,1	0,7	0,1	0,2	4,19
Máximo	84,8	300	296,8	164,9	138,8	171,6	142,6	71,64
DE	24,8	93,2	80,1	52,7	53,5	43,7	41,3	19,27
CV (%)	92,6	109,4	105,1	130,9	106,2	140,3	125,8	86,40

Nota. N-NH⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO⁻: nitrógeno disponible como nitrato; P: fósforo; Mg: magnesio; S: azufre; K: potasio; Ca: calcio; CIC: capacidad de intercambio catiónico. DE: desviación estándar; CV: coeficiente de variación. N-NH⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO⁻: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro. *Fuente:* Equipo investigador.

Una tendencia similar se observó en los microelementos de los suelos, altos valores de coeficiente de variación, en el que B presentó el porcentaje más alto (198,5%) (Tabla 17).

Tabla 17

Valores promedio, máximo y mínimo de los microelementos presentes en los suelos de las 15 fincas del municipio Ocaña, Norte de Santander

Estadísticos descriptivos	Zn	B	Fe	Mn	Cu	Na	Al	Cl
	ppm			cmol(+)/kg				
Media	47,3	21,7	148,1	130,1	30,9	32,9	0,30	2,34
Mínimo	0,2	0,1	5	2	0,1	0,1	0,1	0,1
Máximo	160,0	184,8	410	436	204,4	196,3	1,69	18,9
DE	59,2	43,1	135,5	130,6	52,7	52,8	45,2	44,7
CV (%)	125,1	198,6	91,5	100,4	170,6	160,6	148,5	191,1

Nota. Zn: zinc; B: boro; Na: sodio; Al: aluminio; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Cl: cloro. DE: desviación estándar; CV: coeficiente de variación.

Fuente: Equipo investigador

Los valores promedios de las variables químicas analizadas se encuentran en niveles medio a alto según su comparación con los niveles críticos descritos en el manual de fertilizantes en diversos cultivos de la quinta aproximación del ICA (1992).

Para el caso del nitrógeno disponible, la concentración de nitrato fue mayor que la de amonio, esto es particularmente importante porque en condiciones favorables para el crecimiento de las plantas, la mayor parte del amonio en el suelo se convierte en nitrato, siendo este último inmediatamente disponible para uso de las plantas y microorganismos del suelo. Pero se debe tener cuidado con el manejo que se dé a los cultivos, porque el nitrato puede perderse por lixiviación, dada su alta movilidad en el suelo, o se puede perder por volatilización a través de proceso de denitrificación, es decir, se reduce a formas gaseosas como el óxido nitroso (N₂O) o nitrógeno elemental (N₂) (Vitousek & Matson, 1985; Vitousek & Melillo, 1979).

El valor de P encontrado es catalogado como muy alto según las tablas de referencia para este elemento. Un adecuado nivel de P en los suelos ayuda a las raíces de las plantas a desarrollarse rápidamente, incrementa la eficiencia del uso del agua, contribuye a la resistencia de algunas plantas a enfermedades y permite rendimientos más altos y mayor calidad de los cultivos. En los sitios con deficiencia de P, es posible encontrar plantas pequeñas, con hojas deformadas, baja fructificación, pobre desarrollo radical, raquitismo, entrenudos cortos, áreas muertas en hojas, frutos y tallos y retardos en la madurez de los cultivos. Por otro lado, los niveles muy altos de P encontrados en algunos de los sitios probablemente se deban a un efecto de fertilización más que a la fertilidad natural de los suelos, puesto que las regiones tropicales se caracterizan por presentar contenidos medios a bajos de P. Cuando los niveles de P en los suelos son altos (mayores de 40 ppm) existe una baja probabilidad de respuesta de las plantas a la fertilización con este elemento (Srivastava & Sing, 1988).

Las concentraciones de potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) disponibles encontradas en los suelos son catalogadas como altas. Sin embargo, es de hacer notar que a manera general los valores de magnesio son mayores a los de calcio lo que pudiera generar ciertos problemas en la absorción de calcio en los suelos. También es importante tomar en cuenta el porcentaje de saturación del elemento en el complejo de cambio, así como el pH del suelo (Yimer et al., 2008).

Una adecuada cantidad de K en los suelos reduce el daño producido por enfermedades y plagas en los cultivos. Para el caso del maíz, el potasio tiene un gran impacto en la calidad del cultivo incidiendo en factores como el incremento del peso de cada grano y la cantidad de granos por mazorca en el maíz. Por otro lado, uno de los problemas más comunes en el manejo de los nutrientes y la fertilización, es el desbalance en el uso de N y K. Los agricultores a menudo usan cantidades altas de N, por encima de lo adecuado, cuando esto sucede sin un balance apropiado con K los rendimientos de los cultivos tienden a disminuir (Porta et al., 2003).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) encontrada en los suelos de las 15 fincas estudiadas es alta. Esta es una variable que se asocia con la textura, el tipo de arcilla y el contenido de materia orgánica del suelo. En Colombia, la CIC de los suelos es muy variable, aún dentro de una misma región, lo cual se evidencia también en estos

casos en los valores mínimo y máximo obtenidos. Es deseable que un suelo presente una CIC alta (mayor de 20 cmol(+)/kg), asociada con una buena saturación de bases, ya que esto indica una gran capacidad potencial de suministro y reserva de calcio, magnesio y potasio (Yimer et al., 2008; Stevenson & Cole, 1999).

La gran diferencia encontrada entre los valores mínimo y máximo de los diferentes elementos analizados puede ser explicada por la alta variabilidad espacial intrínseca que presentan los suelos asociada principalmente a su formación, que en este caso está caracterizado por procesos morfodinámicos activos de tipo coluvial, así como deslizamientos de material que afectan la distribución natural de los nutrientes en los suelos. Por ejemplo, en algunas de las zonas analizadas, los suelos presentaron una fertilidad natural muy baja, mientras que en otras se encontraron valores muy altos de los diferentes elementos. Es probable que esta última condición se deba en gran parte a los residuos de fertilizaciones químicas y encalados realizados, sin tomar en cuenta las necesidades nutricionales de los cultivos ni su disponibilidad en el suelo. En este sentido, se debe dar un manejo localizado atendiendo a esa variabilidad espacial encontrada en las propiedades químicas y físicas de los suelos (Porta et al., 2003).

En la tabla 18 se muestra la comparación de medias de algunas variables físicas y química de los suelos bajo el modelo agroecológico y el testigo. El pH encontrado en ambos suelos se catalogó como de fuerte a extremadamente ácido, sin embargo, estadísticamente no son diferentes según la prueba t Student ($p > 0,05$). Desde el punto de vista textural, en ambos casos se trata de suelos franco, en donde el porcentaje de limo resultó estadísticamente mayor en los suelos bajo el modelo agroecológico con respecto al testigo. La materia orgánica (MO), el carbono orgánico (CO), el porcentaje de humedad (%H), la saturación con bases (%SB) y la densidad aparente (Da), no presentaron diferencias estadísticas entre el modelo agroecológico y el testigo.

Tabla 18

Comparación de medias de las variables físicas y químicas de los suelos entre la parcela testigo y la agroecológica en las 15 fincas estudiadas

Parcela	pH	Ce	Arena	Limo	Arcilla	MO	CO	Humedad	SB	Da
		mS/cm	%							g/cm ³
Agroecológico	5,5	0,3	29,4	45,2	25,1	3,4	2,0	44,9	82,9	1,2
Testigo	5,7	0,3	47,0	34,7	18,3	2,8	1,6	43,0	99,5	1,3
t Student	0,8	0,7	2,02*	1,83*	1,21	1,5	1,58	1,0	0,39	1,8

Nota. *Valor significativo ($p < 0,05$) para la comparación de medias por la prueba de t de Student entre las variables físicas y químicas de las parcelas agroecológicas y el testigo en el municipio Ocaña. CE: conductividad eléctrica; MO: materia orgánica; CO: carbono orgánico; SB: saturación con bases; Da: densidad aparente. *Fuente:* Equipo investigador

El porcentaje de materia orgánica (MO) se considera bajo según los datos reportados para zonas entre los 1000 y 2000 msnm, mientras que el porcentaje de saturación con bases es alto en ambos suelos. La CE no muestra problemas de sales y los valores de Da por su parte no reflejan problemas de compactación (Porta et al., 2003).

La comparación de medias de las variables relacionadas con los macroelementos en el suelo entre las parcelas agroecológicas y las parcelas testigos no mostró diferencia estadística ($p > 0,05$) en las fincas estudiadas en el municipio Ocaña con excepción de la CIC que fue significativamente mayor ($p < 0,05$) en las parcelas agroecológicas en relación con las parcelas testigo (Tabla 19).

Tabla 19

Comparación de medias de las concentraciones de macroelementos en suelos entre la parcela testigo y la agroecológica en las diferentes fincas estudiadas en el municipio Ocaña

Parcela	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	P	Mg	S	K	Ca	CIC
	ppm		cmol(+)/Kg					
Agroecológico	13,1	29	22,5	3,4	10,7	0,4	6,8	17,3
Testigo	12,6	16,3	12,6	3,3	12,2	0,3	5,8	13,6
t Student	0,2 ns	1,1 ns	0,9 ns	0,9 ns	0,2 ns	0,9 ns	0,5 ns	1,7*

Nota. ns: diferencia no significativa ($p > 0,05$); *: diferencia significativa para la comparación de medias por la prueba de t de Student para $P \leq 0,05$ para la comparación de medias por la prueba de t de Student; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; P: fósforo; Mg: magnesio; S: azufre; K: potasio; Ca: calcio; CIC: capacidad de intercambio catiónico. *Fuente:* Equipo investigador

En relación con el amonio y el nitrato, a pesar de no presentar diferencias estadísticamente significativas, se observa una tendencia a una mayor concentración en el modelo agroecológico y a su vez, el nitrato resultó más alto en este último. Esto puede indicar que en el suelo bajo el modelo agroecológico se están dando condiciones favorables para que las bacterias nitrificantes conviertan el amonio a nitrato, siendo este último la principal forma de absorción de N por las plantas. Por su parte, los valores promedio de K, Ca, Mg, P y S mostrados en la tabla 19, se catalogan en un nivel alto en el suelo. En cuanto a la CIC, tanto el modelo agroecológico como el testigo están por debajo de 20 cmol(+)/kg de suelo, lo que indica un nivel medio en los suelos (Porta et al., 2003).

La comparación de medias de la concentración de microelementos entre las parcelas agroecológicas y la testigo no mostró diferencias estadísticas ($p > 0,05$) para ninguna de las nueve variables medidas en las 15 fincas en el municipio Ocaña (Tabla 20).

Tabla 20

Comparación de medias de la concentración de microelementos y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) entre las parcelas agroecológica y testigo en las 15 fincas del municipio Ocaña, Norte de Santander

Parcela	Zn	B	Fe	Mn	Cu	Na	Al	Cl
	ppm					cmol(+)/Kg		
Agroecológico	4,3	0,2	113,2	65,3	0,5	0,4	0,9	0,9
Testigo	2,9	0,2	77,2	66,1	0,3	0,5	1,3	0,9
t Student	0,8	1,2	1,2	0,02*	0,9	0,6	0,6	0,4

Nota. *diferencia significativa para la comparación de medias por la prueba de t de Student para $P \leq 0,05$. Zn: zinc; B: boro; Na: sodio; Al: aluminio; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Cl: cloro. *Fuente:* Equipo investigador

Es importante destacar que tanto en el modelo agroecológico como en el testigo se presentaron valores bajos de Zn, B, Cu y Cl, mientras que el Fe y el Mn fueron altos. En suelos con pH muy bajo como se presentan en este estudio, algunos micronutrientes pueden hacerse lo suficientemente solubles como para ser tóxicos para las plantas. El Mn, por ejemplo, puede impedir el crecimiento de las raíces. Al encalar el suelo para elevar el pH reduce el peligro de toxicidad. A medida que los valores de pH aumentan, se incrementan también las posibilidades de que se produzcan deficiencias de micronutrientes, con excepción del Mo y el Cl (Porta et al., 2003).

El Zn es el micronutriente que con más frecuencia limita los rendimientos de los cultivos debido a que ayuda en la síntesis de sustancias que permiten el crecimiento de la planta y la síntesis de varios sistemas enzimáticos, es esencial para promover ciertas reacciones metabólicas y además es necesario para la producción de clorofila y carbohidratos. Por ejemplo, una deficiencia de Zn en maíz hace que el ápice se torne de color amarillento claro o blanco en las etapas iniciales de crecimiento de la planta, las hojas desarrollan franjas de color amarillento (clorosis) localizadas a un lado o a ambos lados de la nervadura central (Stevenson & Cole, 1999).

La deficiencia de B generalmente detiene el crecimiento de la planta, primero dejan de crecer los tejidos apicales y las hojas más jóvenes, debido a la baja movilidad del elemento dentro de la planta. El encalado de los suelos puede reducir significativamente la disponibilidad de B en los suelos. El Cl es un micronutriente vital que está involucrado en las reacciones energéticas de la planta, específicamente en la activación de varios sistemas enzimáticos, de igual forma está involucrado en el transporte de cationes K, Ca, Mg dentro de la planta, regulando la apertura y cierre de las células guardianes de los estomas, controlando de esta forma la pérdida de agua y el estrés de humedad y manteniendo la turgencia de las células (Porta et al., 2003).

El Cu es un micronutriente que las plantas requieren para la formación de clorofila cuya deficiencia suele presentarse en suelos arenosos bajos en materia orgánica debido a las pérdidas por lixiviación. La presencia en exceso de otros metales como el Fe, Mn y el Al afectan la disponibilidad de Cu para las plantas como es el caso que pudiera estar ocurriendo en los suelos analizados en este estudio (Stevenson & Cole, 1999).

Al comparar el efecto de los tres modelos agroecológicos sobre los macro y microelementos de los suelos en el municipio Ocaña, se encontró que el Ca y el Mg en el modelo 1 resultaron significativamente más altos ($p < 0,05$) con un valor de concentración de 8,93 y 7,33 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, respectivamente, mientras que entre los modelos 2 y 3 no se encontraron diferencias. La concentración de P resultó estadísticamente mayor ($p < 0,05$) en el modelo 3 con respecto al modelo 2, en tanto que el modelo 2 no presentó diferencias con el modelo 1 y 3. El Mn por su parte, presentó un valor significativamente mayor en el modelo 1 con respecto al modelo 2 pero igual al modelo 3 (Tabla 21).

Tabla 21

Análisis de la varianza para la comparación de los elementos químicos en los suelos bajo los diferentes modelos agroecológicos implementados en el municipio Ocaña, Norte de Santander

Modelo	K	Ca	Mg	Na	Al	CIC	Cl	P	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	cmol(+)/100Kg								ppm							
NC-C-P	0,4a	0,4a	1,4b	0,4a	2,2a	14,7a	0,8a	1,7b	9,7a	7,5a	8,5a	67,6a	22,8b	0,3a	0,7a	0,2a
NC-A-M	0,3a	0,3a	7,3a	0,2a	0,5b	14,7a	0,8a	12,2ab	13,8a	22,5a	4,3a	108,1a	119,5a	0,2a	4,4a	0,3a
NC-A-F	0,4a	0,4a	1,4b	0,6a	0,6ab	17,0a	1,2a	38,8a	15,1a	38,0a	21,0a	110,2 ^a	56,8ab	0,6a	5,8a	0,2a
CV (%)	67,4	67,4	90,7	129,0	137,6	40,9	50,2	141,3	69,9	133,5	163,8	89,9	112,8	116,2	133,4	52,3
EE*	0,08	0,08	1,0	0,2	0,5	2,00	0,2	7,9	2,8	9,6	6,0	27,1	23,4	0,1	1,5	0,03

Nota. Valores promedio seguidos con letras desiguales en las columnas difieren entre modelos agroecológicos ($p < 0,05$) según prueba de Tukey. **NC:** Nogal Cafetero, **A:** Aguacate, **M:** Maíz, **C:** Cacao, **P:** Plátano, **F:** Frijol. N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃: nitrógeno disponible como nitrato; P: fósforo; Mg: magnesio; S: azufre; K: potasio; Ca: calcio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Zn: zinc; B: boro; Na: sodio; Al: aluminio; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Cl: cloro. EE: error estándar; CV: coeficiente de variación. *Fuente:* Equipo investigador

El resultado del análisis de varianza para las variables físicas y químicas de los suelos entre modelos agroecológicos en los diferentes municipios mostró diferencias para la CE y SB ($p < 0,05$). El modelo 2 resultó con una CE significativamente más baja con respecto al modelo 3, mientras que la SB fue estadísticamente mayor en el modelo 1 mostrando diferencias con los modelos 2 y 3 (Tabla 22).

Tabla 22

Análisis de la varianza para la comparación de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos bajo los tres modelos agroecológicos implementados en el municipio Ocaña, Norte de Santander

Modelo	pH	Ce mS/cm	Arena	Limo	Arcilla	MO	CO	Humedad	SB	Da g/cm ³	
			%								
1	NC-C-P	5,2a	0,2a	43,0a	36,1a	20,0a	3,3a	1,8a	45,4a	43,4b	1,3a
2	NC-A-M	5,8a	0,2ab	40,5a	40,2a	19,6a	3,3a	1,9a	44,4a	177,1a	1,1a
3	NC-A-F	5,7a	0,5b	31,2a	43,5a	25,8a	2,9a	1,7a	42,1a	53,2b	1,3a
	CV (%)	11,4	84,2	66,4	41,7	70,8	31,9	32,1	12,1	107,3	414,9
	EE*	0,2	0,08	8,02	5,3	4,9	0,3	0,2	1,7	30,9	6,9

Nota. Valores promedio seguidos con letras desiguales en las columnas difieren entre modelos agroecológico ($p < 0,05$) según prueba de Tukey. NC: Nogal Cafetero, A: Aguacate, M: Maíz, C: Cacao, P: Plátano, F: Frijol. CE: conductividad eléctrica, SB: saturación con bases, Da: densidad aparente, CV: coeficiente de variación, EE: error estándar.

Fuente: Equipo investigador

El análisis de varianza para la interacción finca x modelo agroecológico para los elementos químicos en el municipio Ocaña mostró diferencias estadísticas para el calcio, el magnesio, el sodio, la capacidad de intercambio catiónico, la concentración de $N-NO_3^-$, el hierro y el zinc (Tabla 23). Un análisis más detallado dentro de las fincas de cada modelo refleja que para el calcio y el magnesio hay diferencia estadística en el modelo 2, para la CIC hay diferencia entre las fincas para los modelos 1 y 3, en la concentración de $N-NO_3^-$ en el modelo 2, para el hierro dentro del modelo 3, y para el zinc en el modelo 2. Esto refleja que de alguna forma en los tres modelos agroecológicos de Ocaña se partió de condiciones nutricionales no uniformes entre las fincas en varias variables químicas de los suelos, que podrían variar, pero no desde el punto de vista estadístico.

Tabla 23

Análisis de la varianza para la comparación de algunos elementos químicos de los suelos en la interacción finca x modelo agroecológico en el municipio Ocaña, Norte de Santander

Finca	Modelo	K	Ca	Mg	Na	Al	CIC	Cl	P	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
		cmol(+)/100Kg								ppm							
1	Modelo 1 NC-C-P	0,4a	10,8ab	13,8a	0,1a	0,01b	16,0a	1,0b	21,5a	26,5ab	7,5a	5,0b	209,5a	143,5ab	0,2a	1,3a	0,30a
2		0,5a	7,2ab	2,8c	0,1a	0,01b	21,0a	1,0b	4,0a	10,0bcd	62,5a	6,5b	135,0a	282,5a	0,2a	10,3a	0,44a
3		0,3a	2,1b	1,4c	0,1a	2,5ab	20,5a	0,6b	2,5a	10,5bcd	5,0a	1,0b	56,5a	14,0b	0,2a	6,7a	0,18a
4		0,1a	15,6a	11,0ab	0,1a	0,01b	7,0a	0,8b	23,0a	14,5bcde	5,0a	1,5b	73,0a	87,5ab	0,2a	0,9a	0,20a
5		0,2a	9,0ab	7,8b	0,6a	0,01b	9,0a	0,8b	10,0a	7,5de	32,5a	7,5b	66,5a	70,0ab	0,3a	2,8a	0,1a
1	Modelo 2 NC-A-M	0,8a	5,9ab	3,4c	0,1a	0,4ab	21,0a	0,6b	1,5a	24,0abc	10,0a	1,5b	111,5a	47,5ab	0,2a	1,5a	0,2a
2		0,2a	6,8ab	2,0c	0,4a	0,01b	8,5a	0,8b	2,0a	4,5e	5,0a	3,0b	18,5a	12,5b	0,3a	0,2a	0,1a
3		0,3a	1,4b	0,6c	0,1a	2,9ab	13,0a	0,7b	1,5a	9,0de	5,0a	2,0b	34,0a	28,0b	0,4a	0,9a	0,2a
4		0,4a	0,4b	0,4c	1,1a	3,6ab	14,5a	1,2b	1,5a	4,0e	5,0a	34,0ab	14,0a	13,5b	0,3a	0,4a	0,1a
5		0,2a	2,1b	0,6c	0,1a	4,4a	16,5a	0,6b	2,0a	7,0de	12,5a	2,0b	160,0a	2,5b	0,4a	0,5a	0,2a
1	Modelo 3 NC-A-F	0,8 ^a	6,1ab	2,6c	1,1a	0,4ab	12,5a	0,9b	50,0a	6,5e	35,0a	26,5ab	87,5a	68,0ab	0,4a	5,3a	0,2a
2		0,3a	4,9ab	0,6c	0,1a	0,01b	22,0a	0,9b	43,0a	8,5de	12,5a	8,0b	86,5a	63,5ab	0,3a	8,2a	0,1a
3		0,2a	14,6a	2,6c	0,1a	0,01b	23,5a	0,9b	16,5a	21,0abcd	20,0a	4,0b	99,5a	12,0b	0,4a	2,2a	0,2a
4		0,6a	7,2ab	1,2c	1,6a	0,3b	12,5a	2,4a	83,0a	7,5de	100,0a	65,5a	227,5a	83,5ab	1,5a	13,3a	0,2a
5		0,2a	0,6b	0,3c	0,4a	2,2ab	14,5a	0,8b	1,5a	32,0a	22,5a	4,0b	49,5a	57,0ab	0,4a	0,2a	0,1a
CV (%)		46,8	43,1	23,9	97,0	91,2	31,2	31,3	131,0	27,8	110,6	108,4	83,1	93,5	118,3	120,3	43,7
EE*		0,02	5,3	0,5	0,1	0,7	16,5	0,1	374,5	9,1	444,3	109,3	4428,8	2666,3	0,1	13,5	0,01

Nota. Valores promedio seguidos con letras desiguales en las columnas difieren entre fincas para cada modelo agroecológico ($p < 0,05$) según prueba de Tukey. Modelo 1: NC: Nopal Cafetero, A: Aguacate, M: Maíz; Modelo 2: NC: Nopal Cafetero, C: Cacao, P: Plátano; Modelo 3: NC: Nopal Cafetero, A: Aguacate, F: Frijol. N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; P: fósforo; Mg: magnesio; S: azufre; K: potasio; Ca: calcio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Zn: zinc; B: boro; Na: sodio; Al: aluminio; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Cl: cloro. EE: error estándar; CV: coeficiente de variación. *Fuente:* Equipo investigador

El análisis de varianza para la interacción finca x modelo agroecológico para las variables químicas en el municipio Ocaña arrojó una concentración de Ca significativamente mayor en la finca 4 del modelo 1 y en la finca 3 del modelo 3. Por su parte, el Mg y el N-NH_4^+ fueron más altos que el resto de los elementos en la finca 1 del modelo 1. Adicionalmente el N-NH_4^+ igualmente alto en la finca 1 modelo 2 y en la finca 5 modelo 3. El S presentó un valor significativamente alto ($p < 0,05$) en la finca 4 modelo 3. Por último, se encontró una concentración de manganeso significativamente mayor en la finca 2 del modelo 1 (Tabla 23).

Un análisis de las fincas en el interior de cada modelo refleja que para la concentración de calcio hay diferencias en los modelos 1 y 3, para la de magnesio en el modelo 1, para la del aluminio en el modelo 2, para los cloruros en el modelo 3. Además, se denota diferencia entre las fincas para la concentración de nitrógeno en forma de N-NH_4^+ , en los modelos 1, 2, y 3, para la del azufre en el modelo 3 y para el manganeso dentro del modelo 1. Esto refleja que en los tres modelos agroecológicos de Ocaña se partió de condiciones no uniformes entre las fincas al menos en alguna de las siete variables químicas de los suelos referidas. Esto deberá tenerse en cuenta al momento de los análisis estadísticos y en los resultados finales de cada finca, ya que cada finca podría ser un caso diferente, aunque se siembre el mismo modelo, sobre todo en el caso del amonio que es muy importante en la nutrición de las plantas y presentó diferencia en las fincas de los tres modelos agroecológicos.

El análisis de varianza para la interacción finca x modelo agroecológico para las variables químicas en el municipio Ocaña, refleja diferencia estadística para la variable el pH, la conductividad eléctrica y la saturación de bases. En un análisis entre las fincas de cada modelo se puede observar que, en cuanto al pH hay diferencia entre los valores en el modelo 1 (más de una unidad) y para la conductividad eléctrica en el modelo 3 (5 veces superior). Además, se percibe diferencia estadística entre las fincas para la saturación de bases en el modelo 1 (más de 15 veces en una finca que en otras) (Tabla 24).

Los resultados de las interacciones fincas x modelo reflejan que hay un efecto del tipo de cultivo sobre las características químicas de los suelos. Se observa un ligero incremento en los valores de pH de los suelos en casi todas las fincas de los modelos 2 y 3, lo cual resulta

positivo para la disponibilidad de los nutrientes en los suelos en esos modelos.

Adicionalmente, se ha puesto en evidencia que los suelos del municipio Ocaña presentan diferencias en su taxonomía y su textura. Además, los resultados de los análisis de los macronutrientes de las 15 fincas del municipio muestran una variabilidad espacial muy alta reflejados en las oscilaciones de los valores máximos y mínimos y en los altos valores del coeficiente de variación, situación que se repite en los microelementos.

Tabla 24

Análisis de la varianza para la comparación de algunas variables físicas y elementos químicos de los suelos en la interacción finca x modelo agroecológico en el municipio Ocaña, Norte de Santander

Finca	Modelo	pH	CE mS/cm	Arena	Limo	Arcilla	MO	CO	Humedad	SB	Da g/cm ³
				%							
1	Modelo 1 NC-C-P	6,3ab	0,2b	23,5a	60,5a	60,5a	3,4a	1,9a	48,0a	201,5b	1,2a
2		5,6abc	0,5ab	20,0a	43,5a	43,5a	3,1a	1,9a	45,5a	56,8b	1,1a
3		5,0abc	0,1b	30,0a	33,5a	33,5a	3,3a	1,9a	43,0a	22,5b	1,2a
4		6,6a	0,1b	60,0a	40,0a	40,0a	2,9a	1,7a	43,0a	416,4a	1,5a
5		5,4abc	0,3b	69,0a	23,5a	23,5a	3,8a	2,2a	42,5a	188,5b	1,4a
1	Modelo 2 NC-A-M	5,4abc	0,2b	33,0a	27,5a	39,5a	2,8a	1,6a	43,5a	47,3b	1,3a
2		5,7abc	0,1b	66,5a	27,0a	2,0a	5,0a	2,9a	43,0a	123,6b	1,4a
3		5,3abc	0,1b	44,5a	38,5a	17,0a	2,3a	1,3a	42,5a	18,7b	1,3a
4		5,1abc	0,3b	27,5a	57,5a	15,0a	2,7a	1,6a	52,0a	8,2b	1,1a
5		4,6c	0,2b	43,5a	30,0a	26,5a	3,0a	1,8a	46,0a	19,1b	1,2a
1	Modelo 3 NC-A-F	5,3abc	0,4b	51,0a	32,0a	32,0a	2,4a	1,4a	39,0a	81,3b	1,4a
2		6,5a	0,3b	3,5a	61,5a	61,5a	2,9a	1,7a	46,5a	27,4b	1,2a
3		6,3ab	0,4ab	8,5a	52,0a	52,0a	3,5a	2,0a	48,5a	74,8b	1,2a
4		5,6abc	1,1a	57,0a	25,0a	25,0a	2,6a	1,5a	34,5a	72,0b	1,4a
5		4,9bc	0,2b	36,0a	47,0a	47,0a	2,9a	1,7a	42,0a	10,3b	1,3a
CV (%)		7,1	59,5	55,8	34,8	34,8	32,6	32,6	10,9	56,4	415,3
EE*		0,1	0,02	322,1	136,5	136,5	0,7	0,2	16,3	1874,0	338,5

Nota. Valores promedio seguidos con letras desiguales en las columnas difieren entre fincas para cada modelo agroecológico ($p < 0,05$) según prueba de Tukey. CE: conductividad eléctrica, SB: saturación con bases, Da: densidad aparente, CV: coeficiente de variación, EE: error estándar. Modelo NC: Nopal Cafetero, A: Aguacate, M: Maíz; Modelo NC: Nopal Cafetero, C: Cacao, P: Plátano; Modelo NC: Nopal Cafetero, A: Aguacate, F: Frijol. *Fuente:* Equipo investigador

Aunque la comparación de medias de las variables químicas entre la parcela agroecológica y la parcela testigo no haya manifestado diferencia estadística en la mayoría de las variables es favorable para la comparación de la parcela agroecológica con el testigo, pero no se favorece con el sistema agroforestal en ambas parcelas y el bajo nivel de paquetes agroecológicos implementados en esta última.

Las diferencias encontradas entre los modelos de un mismo municipio en cuanto a las variables químicas hay que tenerlas muy presentes a la hora de validar un modelo sobre el otro. El resultado del ANOVA referente a las interacciones fincas x modelos agroecológicos en los diferentes municipios demuestran que existen diferencias estadísticas en muchas variables tanto químicas entre las fincas de un mismo modelo, lo que indica que no se cumple en el proyecto un diseño experimental clásico por no existir la uniformidad en las repeticiones, lo cual que no favorece la realización de los análisis de varianza.

Los resultados de los análisis de los macronutrientes de las 15 fincas del municipio muestran una variabilidad espacial reflejada en las oscilaciones de los valores máximos y mínimos y en los altos valores del coeficiente de variación asociados a los procesos coluviales predominantes en la zona.

Al analizar los microelementos en las 15 fincas de cada municipio también se observa una variación espacial reflejada en los altos coeficiente de variación para casi todas las variables medidas. La comparación de medias de las variables químicas entre la parcela agroecológica y la parcela testigo no manifestó diferencia estadística para ninguna de las 10 variables medidas en las fincas, salvo algunas excepciones.

La comparación de medias de los contenidos de microelementos y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) entre las parcelas agroecológicas y las parcelas testigos no manifestó diferencia estadística para ninguna de las nueve variables medidas en las fincas.

Los análisis de varianzas aislados para modelos en las variables químicas pusieron en evidencia que había diferencias para muchas variables dentro de los municipios y que era necesario profundizar en el interior de los modelos agroecológicos.

Los análisis de las interacciones fincas x modelos agroecológicos en los diferentes municipios demuestran que existen diferencias estadísticas en muchas variables químicas entre las fincas de un mismo modelo, lo que no favorece la realización de los análisis de varianza

por la no uniformidad inicial entre las repeticiones, lo que obliga a enfatizar en el resto de los análisis estadísticos previstos en el proyecto para la validación de los modelos agroecológicos.

3.3 Conclusiones parciales

En el municipio de Ocaña, se identifican dos tipos de paisaje: montaña y lomerío, en un ambiente denudacional. El clima en la montaña es húmedo mientras en el lomerío es seco. Es decir, los factores formadores de los suelos son; clima, material parental y pendiente, los cuales se constituyen en los parámetros sobre los cuales se establece la relación paisaje-suelo, dando como resultado suelos con presencia o no de fragmentos de roca superficial y/o en profundidad, fertilidad natural baja y diferentes grupos texturales.

Adicionalmente, ante la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa como resultado de las características de pendiente y profundidad efectiva de estos suelos, se dificulta la elección de cultivos a aquellos que desarrollen su sistema radical de forma superficial y cuyos períodos de cosecha sean cortos (por escasa precipitación); estos factores se constituyen en limitantes para el establecimiento de árboles (sistemas forestales, aguacate, etc.).

Por otro lado, es necesario adelantar planes de fertilización y abonamiento porque se le provee de nutrientes necesarios para su desarrollo y se modifican algunas propiedades físicas y químicas de los suelos que deberían redundar en el fácil establecimiento de los cultivos seleccionados. Es decir, las unidades que presentan fragmentos de roca y susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa tendrán una aptitud o capacidad diferente, respecto a otra unidad que no tenga estas características, debido a que cada una de las unidades de tierra, tienen una serie de "cualidades" (grupo de características), que favorecen en mayor o menor grado el desarrollo de un determinado uso o "tipo de utilización".

Este resultado es el producto de diferentes tipos de observaciones: cajuelas y calicatas, distribuidas en cada una de las fincas que hacen parte del programa. En efecto, estas observaciones pudieron determinar la presencia de fragmentos de roca, sus características texturales y la apreciación de la fertilidad natural, propiedades que en conjunto se

encuentran asociadas a la génesis del suelo, llegando a establecer una alta homogeneidad geomorfológica, con lo cual se puede inferir confiablemente propiedades del suelo para todo el paisaje y de esta manera definir la aptitud para un sistema agroecológico a establecer.

Finalmente, las propiedades de los suelos y las características climáticas se deben tener en cuenta para el establecimiento de cualquiera de los sistemas agroecológicos definidos. Ya que, desde el punto de vista de planificación de tierras, no puede existir un suelo, o unidad de tierra, ideal, pues para cada uso particular que el hombre haga de la tierra pueden existir unas condiciones ideales.

En algunas de las zonas analizadas, los suelos presentaron una fertilidad natural muy baja, mientras que en otras se encontraron valores muy altos de los diferentes elementos. Es probable que esta última condición se deba en gran parte a los residuos de fertilizaciones químicas y enclados realizados, sin tomar en cuenta las necesidades nutricionales de los cultivos ni su disponibilidad en el suelo. En este sentido, se debe dar un manejo localizado atendiendo a esa variabilidad espacial encontrada en las propiedades químicas y físicas de los suelos

3.4 Caracterización biológica de los suelos

Los organismos del suelo juegan un papel importante en las dinámicas de los ecosistemas, éstos van a estar determinados por el tipo de clima, cobertura vegetal, uso del suelo, relieve, contribuyendo a la descomposición y mineralización de la materia orgánica, ciclaje de nutrientes, y aportes de nutrientes al suelo como el fósforo y nitrógeno (Usher et al., 2006). Estos factores y la disponibilidad de materia orgánica en cada ecosistema son determinantes para la riqueza de una zona, lo que es indispensable conocer antes de la implementación de cualquier sistema productivo, integrando nuevas actividades agrícolas a las dinámicas previamente existentes, potencializando de éstas las ventajas de cada terreno.

A continuación, se presentan los resultados de la macrofauna, mesofauna y microfauna del suelo correspondiente a las 15 fincas del municipio de Ocaña, Norte de Santander.

La riqueza de especies bajo el modelo agroecológico Nogal Cafetero- Cacao-Plátano (NC-C-P) fue mayor en las fincas El Zancudo, San José, Zorro Cuco y El Caimito en donde se observó el mayor número

de morfoespecies correspondiente a la macrofauna del suelo. Al igual que en el modelo NC-A-M, el orden con mayor representatividad en todas las fincas fue *Hymenoptera*. De igual forma, la riqueza y abundancia tanto en meso como microfauna fue baja (Tabla 25).

Tabla 25

Biología del suelo para el modelo agroecológico Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P)

Finca	Macrofauna		Mesofauna	Microfauna
	Riqueza	Abundancia		
El Zancudo	Se recolectaron 43 individuos distribuidos en: <ul style="list-style-type: none"> • 9 órdenes, • 7 familias y • 18 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Hymenoptera</i> con el 53%.	De los individuos recolectados, la morfoespecie más dominante fue <i>Formicinae</i> sp1 seguida <i>Pseudoescorpionidae</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembola</i> y <i>Acari</i> .	Las muestras obtenidas de esta finca reflejaron una baja población de microorganismos, encontrándose sólo algunos nemátodos y protozoos de hábito saprófago.
San José	Se recolectaron 41 individuos distribuidos en: <ul style="list-style-type: none"> • 8 órdenes, • 14 familias y • 19 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Coleoptera</i> con el 29%, seguido de <i>Hymenoptera</i> con el 26%.	La morfoespecie más dominante fue <i>Lygaeidae</i> sp1 seguida de <i>Formicinae</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembola</i> y <i>Symphyla</i> .	Se halló una abundancia relativamente alta de nemátodos de hábito saprófago, identificando diez especímenes.
Zorro Cuco	Se recolectaron 76 individuos distribuidos en: <ul style="list-style-type: none"> • 8 órdenes, • 7 familias y • 17 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Hymenoptera</i> con el 57%, seguido de <i>Entognatha</i> con el 12%.	La morfoespecie más dominante fue <i>Pheoidole</i> sp1 seguida de <i>Ponerinae</i> sp1.	Al cuantificar la abundancia de mesofauna solamente se encontró <i>Collembolos</i> .	Se encontró presencia de protozoos de la Clase Ciliata.

Finca	Macrofauna		Mesofauna	Microfauna
	Riqueza	Abundancia		
El Caimito	Se recolectaron 62 individuos distribuidos en: <ul style="list-style-type: none"> • 7 órdenes, • 11 familias y • 20 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Hymenoptera</i> con el 24%, seguido de <i>Coleoptera</i> con el 20%.	La morfoespecie más dominante fue <i>Atta</i> sp1 seguida <i>Carabidae</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembolos</i> y <i>Symphyla</i> .	Se evidenció una moderada presencia de organismos de hábito saprófago.
Doña Juana	Se recolectaron 18 individuos distribuidos en: <ul style="list-style-type: none"> • 7 órdenes, • 4 familias y • 9 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Hymenoptera</i> con el 27%, seguido de <i>Blattodea</i> con el 22%.	La morfoespecie más dominante fue <i>Blattidae</i> sp2 seguida <i>Formicinae</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembolos</i> y <i>Arachnida</i> .	Se evidenció la presencia de protozoos de la clase <i>Mastigophorus</i> .

Fuente: Equipo investigador

En la tabla 26 es posible apreciar un resumen de la riqueza y abundancia de la macro, meso y microfauna del suelo bajo el modelo agroecológico Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M). En las fincas San Jacinto y Vida tranquila se observó la mayor riqueza de morfoespecies correspondiente a la macrofauna del suelo. El orden que estuvo presente en mayor representatividad en todas las fincas fue *Hymenoptera*. La riqueza y abundancia tanto en meso como microfauna fue baja.

Tabla 26

Biología del suelo para el modelo agroecológico Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)

Finca	Macrofauna		Mesofauna	Microfauna
	Riqueza	Abundancia		
El Caracol	Se recolectaron 34 individuos distribuidos en: <ul style="list-style-type: none"> • 11 órdenes, • 10 familias, • 17 morfoespecies. El orden con mayor representatividad fue <i>Hymenoptera</i> con el 15%, seguido de <i>Crassiclitellata</i> con el 12%.	De los individuos recolectados se encontró que las morfoespecies más dominantes fueron <i>Armadillidium</i> sp1 seguida de <i>Lumbricus</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembolos</i> y <i>Symphyla</i> seguida por otros grupos taxonómicos.	Se registraron nueve individuos del <i>Phylum</i> Protozoo, clase Ciliata.
Mosquera	Se recolectaron 28 individuos distribuidos en: <ul style="list-style-type: none"> • 7 órdenes, • 7 familias y • 16 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Hymenoptera</i> con el 46%, seguido de <i>Crassiclitellata</i> con el 17%.	De los individuos recolectados la morfoespecie más dominante fue <i>Lumbricus</i> sp1 seguida de <i>Creमतogaster</i> sp1.	Solamente se encontró tres ejemplares de <i>Collembola</i> .	Se evidenció la presencia de un individuo de hábito fitoparásito de la familia <i>Pratylenchidae</i> .
San Jacinto	Se recolectaron 55 individuos de macrofauna distribuidas en: <ul style="list-style-type: none"> • 11 órdenes, • 14 familias y • 27 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Coleoptera</i> con el 28%, seguido de <i>Hymenoptera</i> con el 25%.	La distribución de abundancia de los individuos recolectados muestra que la morfoespecie más dominante fue <i>Chrysomelidae</i> sp4 seguida <i>Odontomachus</i> sp2	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembolos</i> y <i>Symphyla</i> seguida por otros grupos taxonómicos en menor proporción.	Se halló una importante cantidad de nemátodos de hábito saprófago en las muestras de suelos.
Vida Tranquila	Se recolectaron 68 individuos distribuidos en: <ul style="list-style-type: none"> • 13 órdenes, • 12 familias y • 24 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Hymenoptera</i> con el 38%, seguido de <i>Araneae</i> con el 16%.	La morfoespecie más dominante fue <i>Araneae</i> sp3 seguida <i>Solenopsis</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Arachnida</i> y <i>Collembolos</i> seguida por otros grupos taxonómicos como <i>Symphyla</i> y <i>Myriapoda</i> .	Se registró una baja población de microorganismos presentes en la muestra.

Finca	Macrofauna		Mesofauna	Microfauna
	Riqueza	Abundancia		
El Motilón II	Se recolectaron 60 individuos distribuidos en: <ul style="list-style-type: none"> • 5 órdenes, • 6 familias y • 11 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Isoptera</i> con el 43%, seguido de <i>Hymenoptera</i> con el 13%.	La morfoespecie más abundante fue <i>Termitidae</i> sp1 seguida de <i>Formicinae</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembolos</i> y <i>Arachnida</i> .	Se registraron dos tipos de microorganismos componiendo la microfauna de la finca, se obtuvo una abundancia baja de dos <i>Phylum</i> presentes pertenecientes a la clase Ciliata y la familia <i>Anguinidae</i> de hábito saprófago.

Fuente: Equipo investigador

La mayor riqueza de especies bajo el modelo agroecológico Nogal Cafetero- Aguacate-Frijol (NC-A-F) se encontró en las fincas Los Guasimales, El Porvenir y Casitas y el Caimito en donde se observó el mayor número de morfoespecies correspondiente a la macrofauna del suelo. Al igual que en los dos modelos anteriores, el orden *Hymenoptera* estuvo presente en cuatro de las cinco fincas con excepción de la finca Casitas. La riqueza y abundancia tanto de la meso como la microfauna fue baja (Tabla 27).

Tabla 27

Biología del suelo del modelo agroecológico Nogal Cafetero- Aguacate-Frijol (NC-A-F)

Finca	Macrofauna		Mesofauna	Microfauna
	Riqueza	Abundancia		
Los Guasimales	Se recolectaron 35 individuos distribuidos en: <ul style="list-style-type: none"> • 10 órdenes, • 10 familias y • 18 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Hymenoptera</i> con el 23%, seguido de <i>Blattodea</i> con el 11%.	La morfoespecie más dominante fue <i>Lumbricus</i> sp1 seguida <i>Termitidae</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembolos</i> y <i>Symphyla</i> .	Esta finca tuvo una variación en los microorganismos que componen la microfauna del suelo y una importante abundancia de organismos de la clase Ciliata y de las familias <i>Rhabditidae</i> y <i>Anguinidae</i> de hábito saprófago.

Finca	Macrofauna		Mesofauna	Microfauna
	Riqueza	Abundancia		
El Porvenir	Se recolectaron 128 individuos distribuidos en: • 8 órdenes, • 12 familias y • 31 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Hymenoptera</i> con el 44%, seguido de <i>Diplopoda</i> con el 21%.	Las morfoespecies más dominantes fueron <i>Diplopoda</i> seguida <i>Formicinae</i> .	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembolos</i> y <i>Symphyla</i> .	Se hallaron nemátodos de las familias <i>Rhabditiidae</i> y <i>Anguinidae</i> , ambos de hábito saprófago.
Villa Ángel	Se recolectaron 62 individuos distribuidos en: • 5 órdenes, • 5 familias y • 10 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Hymenoptera</i> con el 56%, seguido de <i>Entognatha</i> con el 27%.	La morfoespecie más dominante fue <i>Myrmicinae</i> sp1 seguida de <i>Collembola</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembolos</i> y <i>Arachnida</i> .	Se registraron dos tipos de microorganismos de los <i>Phyllum</i> Protozoos y Nemátodos, clase Ciliata, familia <i>Anguiniidae</i> de hábito saprófago con una abundancia baja.
La Estrella	Se recolectaron 45 individuos distribuidos en: • 8 órdenes, • 6 familias y • 9 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Hymenoptera</i> con el 44%, seguido de <i>Crassicitellata</i> con el 24%.	La morfoespecie más dominante fue <i>Ponerinae</i> sp1 seguida de <i>Lumbricus</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembolos</i> y <i>Arachnida</i> .	Se registraron dos tipos de microorganismos del <i>Phyllum</i> Protozoos clase Ciliata, con una abundancia baja.
Casita	Se recolectaron 36 individuos distribuidos en: • 7 órdenes, • 7 familias y • 18 morfoespecies. El orden con mayor representatividad en la muestra fue <i>Crassicitellata</i> con el 30%, seguido de <i>Cerambycidae</i> sp1 con el 19%.	La morfoespecie más dominante fue <i>Lumbricus</i> sp1 seguida <i>Termitidae</i> sp1.	Las morfoespecies dominantes fueron <i>Collembolos</i> y <i>Symphyla</i> .	Se identificaron 15 individuos protozoarios en la alícuota analizada.

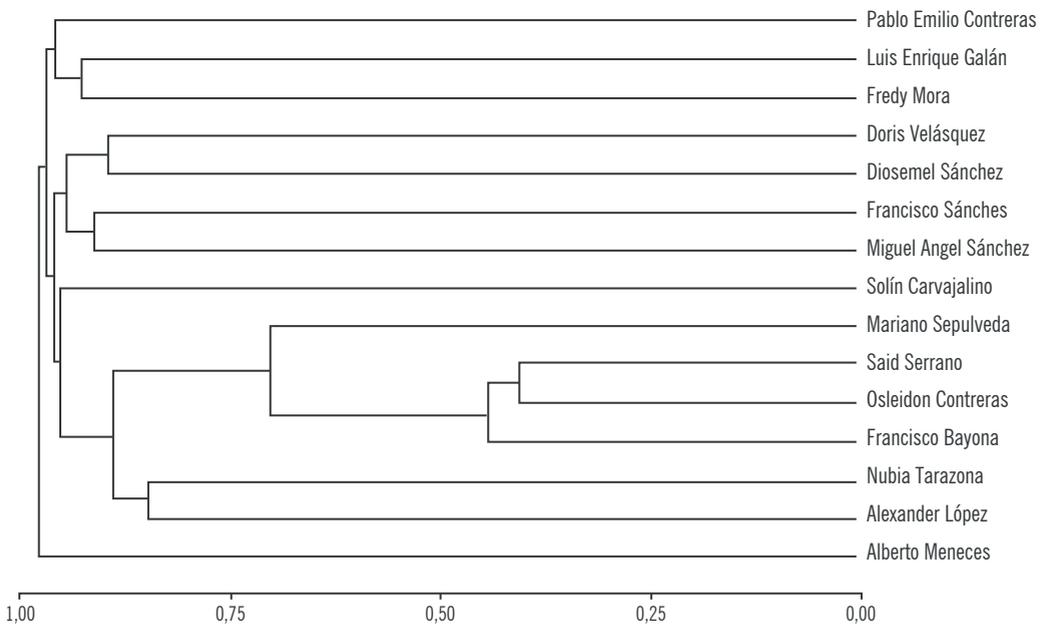
Fuente: Equipo investigador

3.5 Composición de la fauna asociada al suelo

El análisis de similaridad de especies se realizó de acuerdo con la presencia/ausencia de los individuos. Para este análisis se tuvo en cuenta las 122 morfoespecies encontradas en las 15 fincas del municipio de Ocaña. Se observó un soporte de similaridad superior al 89 % para 11 de las 15 fincas estudiadas; en el caso de las fincas El Zancudo, La Estrella, Villa Ángel y San Jacinto, la similaridad osciló entre el 40 al 70 %, esto se atribuye a la variación de humedad de la zona (Figura 9).

Figura 9

Análisis de conglomerados para la fauna del suelo en las 15 fincas del municipio de Ocaña, Norte de Santander



Fuente: Equipo investigador

En las 15 fincas censadas se registraron 795 individuos distribuidos en 122 morfoespecies, 4 *Phylum*, 9 clases, 20 órdenes y 45 familias, siendo el orden *Hymenoptera* el más abundante con 318 individuos, seguido de *Coleoptera* con 86 y *Crassicitellata* con 71. Los órdenes más ricos fueron *Coleoptera* con 25 morfoespecies, *Hymenoptera* con 20 y *Araneae* con 17.

Según el índice de similaridad de Jaccard, 11 de las 15 fincas presentaron una similitud superior al 80 %, siendo 3 fincas contrastantes, teniendo en cuenta su estructura acorde a zonas muy secas, particularmente en las laderas de las cañadas encontradas y con una alta humedad aparente en el fondo de éstas, donde se alberga la mayor cantidad de diversidad y organismos clave para las dinámicas de los ecosistemas de la zona, contribuyendo al buen estado de salud biológica de las fincas.

Cabe aclarar que la finca Villa Ángel presentó una similaridad de relieve con la mayoría de las fincas, su diferencia se atribuye a que el terreno ya se encontraba arado, lo cual reduce significativamente la aparición de organismos propios del área. Para el caso de las 11 fincas que presentaron la similitud más alta, esto se atribuye a la fertilidad aparente del suelo, la buena cobertura vegetal que existía antes de la preparación del terreno y a la semejanza de sus pendientes, contribuyendo a tener ecosistemas homogéneos en su estructura vegetal, otorgando una oferta de recursos similares para los diferentes invertebrados reportados. Es importante resaltar que estos organismos se ven seriamente afectados por las quemas realizadas, destruyendo así su hábitat, desequilibrando la dinámica y las potencialidades de efectos positivos para los cultivos a implementar.

Dentro de las morfoespecies identificadas, resaltan hormigas *Ponerinae*, *Odontomachus* sp y *Camponotus* sp por sus hábitos depredadores. Autores como Ronque et al. (2018) reportan sus hábitos nutricionales enfocados en néctar y la depredación de cochinillas y áfidos, siendo estos últimos una potencial plaga, por lo tanto, convierte a este grupo en potencial controlador biológico, otras de las hormigas que se resalta por su abundancia son las del género *Atta* sp, siendo estas el opuesto de las hormigas previamente descritas. Éstas se encuentran catalogadas como plaga por su alto impacto negativo sobre los cultivos. Muñoz (2017) reporta la alta afectación de esta hormiga arriera en cultivos de aguacate, limón y mango, afectando la productividad hasta

un 100%, por ello es importante conocer la biología de esta hormiga para implementar planes de manejo acordes los cultivos propuestos y las condiciones ecológicas de una zona seca como lo es el municipio de Ocaña.

La microfauna asociada a las muestras obtenidas da cuenta de una variada y abundante vida animal en los suelos estudiados, la alta presencia de nemátodos supone una amplia interacción de la materia orgánica en las diferentes capas de suelo cercanas a la superficie, la cual se tiene que preservar ejecutando acciones agrícolas amigables con las dinámicas ecosistémicas propias de zonas secas y muy secas. Es bien sabido que los nemátodos constituyen un grupo de invertebrados de elevada importancia ecológica y económica que presentan atributos que les convierte en valiosas herramientas como indicadores biológicos y ecológicos, ya que presentan una distribución diferencial en los suelos según su grado de conservación, siendo especialmente sensibles a las prácticas de manejo agrícola tradicionales y a los contaminantes ambientales (Yeates, 2003; Bongers & Ferris, 1999).

3.6 Abundancia, riqueza específica e índices de diversidad, equidad, dominancia para la macrofauna de los suelos

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 28, la mayor abundancia y riqueza de especies se encontró en las fincas El Zancudo, Doña Juana, Los Guasimales, Villa Ángel, Casitas y El Motilón II. El índice de diversidad de Marglef fue mayor en las fincas San José, Los Guasimales, Casitas, El Caracol y San Jacinto. Los índices de equidad y dominancia, en términos generales, fueron bajos en las 15 fincas.

Tabla 28

Abundancia, riqueza específica, diversidad, equidad y dominancia para la macrofauna de los suelos

Finca	Nombre de la finca	Abundancia	Riqueza Específica (S)	Diversidad Margalef (D _{Mg})	Equidad (Shannon-Wiener)	Dominancia (Simpson)
1	El Zancudo	41	5	1,1	0,3	0,3
2	San José	12	7	2,4	0,3	0,2
3	Zorro Cuco	27	10	2,7	0,3	0,3
4	El Caimito	34	8	2,0	0,3	0,2
5	Doña Juana	63	9	1,9	0,3	0,1
6	Los Guasimales	58	12	2,7	0,2	0,1
7	El Porvenir	19	8	2,4	0,3	0,2
8	Villa Ángel	59	7	1,5	0,3	0,2
9	La Estrella	36	7	1,7	0,3	0,2
10	Casitas	49	11	2,6	0,2	0,1
11	El Caracol	31	11	2,9	0,3	0,2
12	Mosquera	39	5	1,1	0,3	0,2
13	San Jacinto	35	11	2,8	0,2	0,1
14	Vida tranquila	43	9	2,1	0,3	0,3
15	El Motilón II	67	9	1,9	0,3	0,1
Promedio		40,9	8,6	2,1	0,3	0,2
Desviación estándar		16,0	2,2	0,6	0,02	0,1

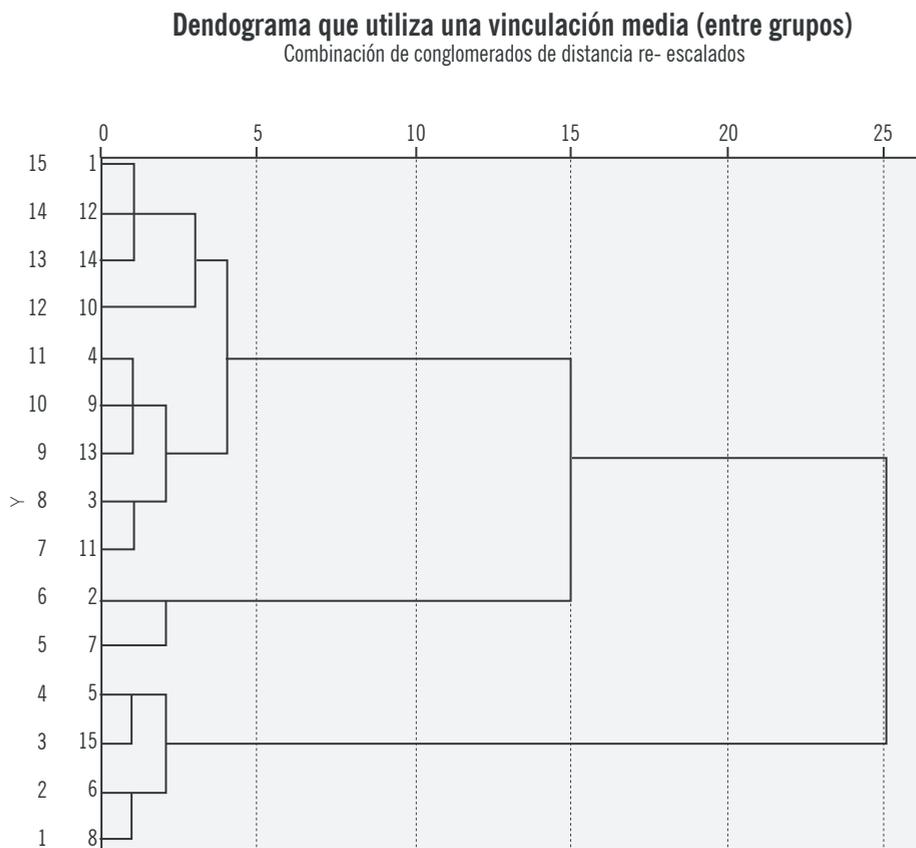
Fuente: Equipo investigador

El análisis de conglomerados busca establecer grupos de los objetos de estudio en función de un conjunto de variables, en este caso la macrofauna de los suelos, con el fin de tener una representación visual de la distancia en la que se combinan los clúster o agrupaciones dependiendo del grado de similitud. Por ejemplo, una línea vertical representa las agrupaciones unidas y la posición de la línea en la escala muestra la distancia a la que se combinan los grupos. La primera línea vertical de arriba hacia abajo corresponde a la distancia más pequeña entre la agrupación o clúster, en este caso las fincas 1 (El Zancudo) y 12 (Mosquera), que presentan el coeficiente de variación más bajo.

Las distancias más grandes entre las agrupaciones que se combinaron permitieron visualizar en el gráfico la presencia de tres segmentos o grupos. El primer grupo de similitud se presentó entre las fincas 1, 12, 14 y 10. Un segundo conglomerado estuvo representado por las fincas 4, 9, 13 y 11. Y una tercera agrupación la conformaron las fincas 2 y 7; 5 y 15 y 6 y 8 (Figura 10).

Figura 10

Análisis de conglomerados de para la macrofauna del suelo



Fuente: Equipo investigador

3.7 Abundancia, riqueza específica e índices de diversidad, equidad y dominancia para la mesofauna de los suelos

La abundancia de la mesofauna del suelo fue menor en comparación con la macrofauna. Las fincas con la mayor abundancia y riqueza de especies fueron Vida tranquila, El Caracol, Doña Juana, El Caimito, Los Guasimales, San José y San Jacinto. El índice de diversidad de Margalef más alto se observó en la finca Villa Ángel, el índice de equidad más alto se encontró en la finca El Caimito y la mayor dominancia de especies se presentó en la finca Casitas (Tabla 29).

Tabla 29

Abundancia, riqueza específica, diversidad, equidad y dominancia para la mesofauna de los suelos

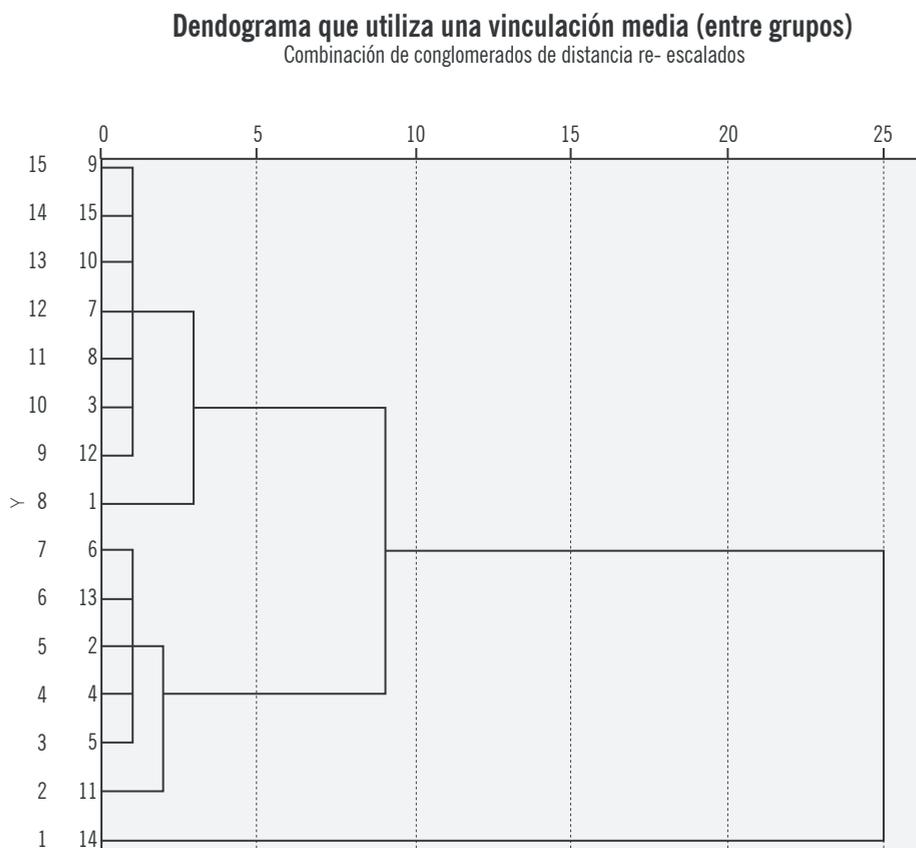
Finca	Nombre de la finca	Abundancia	Riqueza Específica (S)	Diversidad Margalef (D _{Mg})	Equidad (Shannon-Wiener)	Dominancia (Simpson)
1	El Zancudo	8	2	0,5	0,6	0,6
2	San José	11	2	0,4	0,6	0,6
3	Zorro Cuco	2	1	0	0	1
4	El Caimito	13	4	1,2	1,3	0,3
5	Doña Juana	14	3	0,8	0,8	0,6
6	Los Guasimales	12	3	0,8	1,1	0,3
7	El Porvenir	5	2	0,6	0,5	0,7
8	Villa Ángel	5	3	1,2	1,1	0,4
9	La Estrella	4	2	0,7	0,7	0,5
10	Casitas	3	2	0,9	0,6	0,6
11	El Caracol	16	3	0,7	1,1	0,4
12	Mosquera	3	1	0	0	1
13	San Jacinto	11	3	0,8	1,1	0,4
14	Vida tranquila	23	3	0,6	0,9	0,4
15	El Motilón II	4	2	0,7	0,7	0,5
Promedio		8,933	2,4	0,7	0,7	0,5
Desviación estándar		6,017	0,828	0,3	0,4	0,2

Fuente: Equipo investigador

El análisis de conglomerados para la mesofauna del suelo muestra dos grandes agrupaciones, con grados de similitud bastante altos para el primer grupo de fincas (9, 15, 10, 7, 8, 3 y 12) y una menor similitud con la finca 1. Un segundo grupo correspondió a las fincas 6,13, 2, 4, 5 y 11). La finca 14 presentó una distancia muy alta con el resto de las fincas, lo cual evidencia una baja similitud en la mesofauna del suelo (Figura 11).

Figura 11

Análisis de conglomerados para la mesofauna del suelo



Fuente: Equipo investigador

3.8 Abundancia, riqueza específica e índices de diversidad, equidad y dominancia para la microfauna de los suelos

La mayor abundancia de especies de microfauna del suelo se encontró en las fincas Los Guasimales, San Jacinto, Casitas, y El Caimito. La mayor riqueza correspondió a la finca San José, Los Guasimales y Mosquera. El mayor índice de diversidad correspondió a la finca Mosquera, la finca San José mostró la mayor equidad y el índice de dominancia de Simpson más alto se presentó en las fincas Casitas, El Caracol y Vida tranquila (Tabla 30).

Tabla 30

Abundancia, riqueza específica e índices de diversidad, equidad y dominancia para la microfauna de los suelos

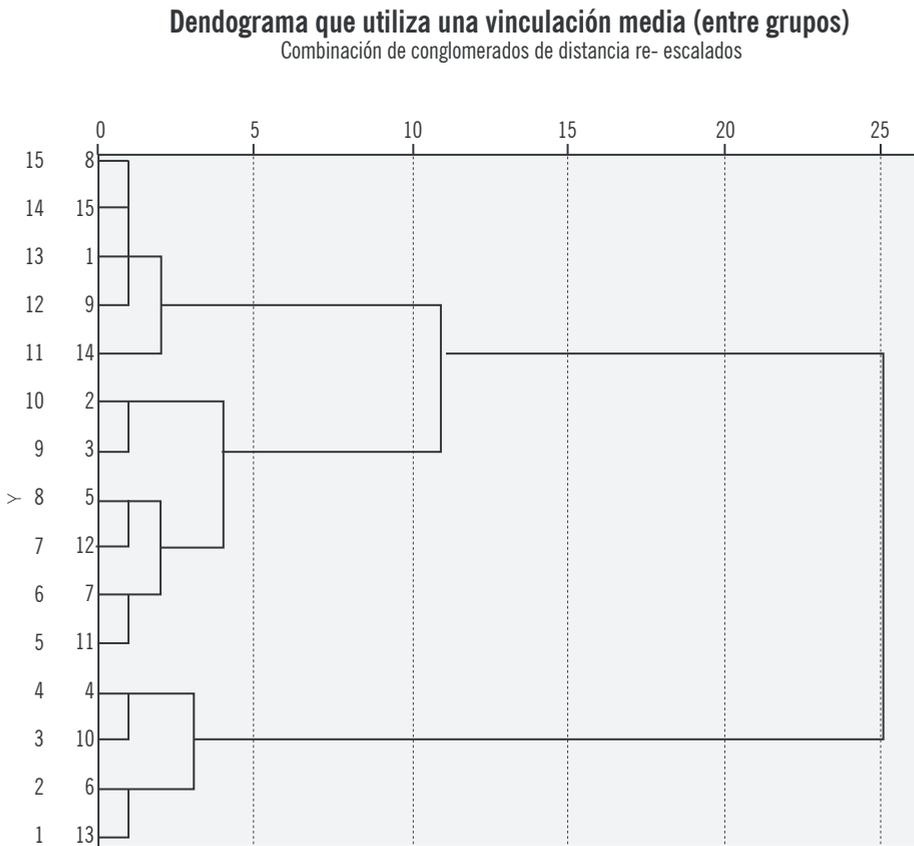
Finca	Nombre de la finca	Abundancia (N)	Riqueza Específica (S)	Diversidad Margalef (D _{Mg})	Equidad (Shannon-Wiener)	Dominancia (Simpson)
1	El Zancudo	5	2	0,6	0,7	0,5
2	San José	12	3	0,8	1,0	0,4
3	Zorro Cuco	12	2	0,4	0,5	0,7
4	El Caimito	15	2	0,4	0,7	0,5
5	Doña Juana	8	2	0,5	0,7	0,5
6	Los Guasimales	18	3	0,7	0,9	0,5
7	El Porvenir	10	2	0,4	0,6	0,6
8	Villa Ángel	4	2	0,7	0,7	0,5
9	La Estrella	3	2	0,9	0,6	0,6
10	Casitas	15	1	0,0	0,0	1,0
11	El Caracol	9	1	0,0	0,0	1,0
12	Mosquera	7	3	1,0	1,0	0,4
13	San Jacinto	17	2	0,4	0,6	0,6
14	Vida tranquila	2	1	0,0	0,0	1,0
15	El Motilón II	4	2	0,7	0,7	0,5
Promedio		9,4	2	0,5	0,6	0,6
Desviación estándar		5,3	0,7	0,3	0,3	0,2

Fuente: Equipo investigador

El análisis de conglomerados arrojó tres grupos bien diferenciados en grado de similitud para la microfauna del suelo. El primer grupo estuvo conformado por las fincas 8, 15, 1, 9 y 14. El segundo grupo similar correspondió a las fincas 2, 3, 5, 12, 7 y 11 y un tercer grupo compuesto por las fincas 4, 10, 6 y 13 (Figura 12).

Figura 12

Análisis de conglomerados para la microfauna del suelo



Fuente: Equipo investigador

3.9 Conclusiones parciales

Los grupos de similitud conformados en la macro, meso y microfauna del suelo puede ser atribuido a la variación de la humedad aparente en la zona, diferenciando las zonas más secas de zonas con una mayor humedad en suelo asociada a la baja pendiente que facilita la retención de agua, promoviendo un mejor microclima para la preservación de especies que contribuyen al ciclaje de nutrientes.

3.10 Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre las variables químicas del suelo

Los valores mínimo, máximo y medio, así como la desviación típica y el coeficiente de variación correspondiente a las variables químicas del suelo son presentados en la tabla 31. El coeficiente de variación observado se encuentra dentro los límites que con frecuencia se presenta en los suelos, con excepción de algunos parámetros como el aluminio, el fósforo, los nitratos y el zinc. El pH se encuentra dentro del intervalo de suelos ácidos a ligeramente ácidos y la materia orgánica para estas condiciones tropicales es categorizada como media.

Los coeficientes de variación de los diferentes datos fueron bajos para el caso del pH del suelo, mientras que para las concentraciones de calcio, magnesio, aluminio, azufre, zinc y saturación de bases estuvieron cercanos y por encima del 100%. El pH promedio de los suelos es ácido y la materia orgánica de baja a media.

Tabla 31

Estadísticos descriptivos de las variables químicas en las 30 parcelas del Modelo Nogal Cafetero-Cacao- Plátano (NC-C-P)

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	CV (%)
Potasio (cmol(+)/kg)	0,1	0,66	0,4	0,2	45,7
Calcio (cmol(+)/kg)	0,5	14,39	5,7	5,2	91,3
Magnesio (cmol(+)/kg)	0,2	6,90	2,4	2,4	100,3
Sodio (milimol/L)	0,2	1,17	0,4	0,3	81,7
Aluminio (cmol(+)/kg)	0,0	3,80	1,3	1,6	126,1
CIC (cmol(+)/kg)	6,2	24,03	15,4	5,9	38,7
Cloruros (meq/100L)	0,3	0,64	0,5	0,1	19,7
Fósforo (ppm)	2,0	13,00	4,5	3,6	79,9
N-NH ₄ ⁺ (ppm)	15,0	42,00	27,9	6,9	24,8
N- N-NO ₃ ⁻ (ppm)	5,0	30,00	16,0	11,3	70,3
Azufre (ppm)	1,0	6,00	1,6	1,6	98,6
Hierro (ppm)	10,0	157,00	79,0	53,8	68,1
Manganeso (ppm)	7,0	72,0	32,6	25,4	78,0
Cobre (ppm)	0,1	0,7	0,3	0,2	89,2
Zinc (ppm)	0,1	1,4	0,3	0,4	163,6
Boro (ppm)	0,1	0,3	0,2	0,1	60,9
pH	4,3	6,8	5,2	0,7	14,2
CE mS/cm	0,1	0,2	0,2	0,1	33,5
Materia orgánica (%)	1,7	3,7	2,8	0,6	20,1
Carbono orgánico (%)	1,0	2,1	1,6	0,3	20,3
Saturación con bases (%)	5,5	194,2	68,2	62,1	91,0
Densidad aparente (g/cc)	1,0	1,5	1,2	0,1	11,9

Nota. K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Cl: cloro; P: fósforo; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Mo: molibdeno; CO: Carbono orgánico; SB: saturación con bases; DA: densidad aparente.
Fuente: Equipo investigador

La estadística descriptiva aplicada a los datos obtenidos tanto en la parcela agroecológica como la testigo no mostró diferencias aparentes entre ellas. El pH de los suelos en las dos parcelas fue ácido y los coeficientes de variación fueron relativamente aceptables con excepción de todos los que excedieron el 100 por ciento (%) (Tabla 32).

Tabla 32

Estadísticos descriptivos de las variables químicas y físicas del suelo para las parcelas agroecológica y testigo del Modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P)

Variable	Tratamiento	Media	Desviación típica	CV (%)
Potasio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	0,4	0,2	55,3
	Parcela Testigo	0,4	0,2	40,9
Calcio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	6,7	6,9	102,4
	Parcela Testigo	4,7	3,4	71,5
Magnesio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	2,3	2,7	119,6
	Parcela Testigo	2,6	2,4	93,8
Sodio (milimol/L)	Parcela Agroecológica	0,5	0,4	78,3
	Parcela Testigo	0,2	0,1	23,1
Aluminio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	1,4	1,9	136,8
	Parcela Testigo	1,2	1,5	126,5
CIC (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	15,0	5,8	38,6
	Parcela Testigo	15,7	6,8	43,1
Cloruros (meq/100L)	Parcela Agroecológica	0,5	0,1	21,1
	Parcela Testigo	0,5	0,1	19,5
Fósforo (ppm)	Parcela Agroecológica	4,6	4,7	102,7
	Parcela Testigo	4,4	2,6	59,3
N-NH ₄ ⁺ (ppm)	Parcela Agroecológica	30,8	6,5	21,1
	Parcela Testigo	25,0	6,7	26,7
N-NO ₃ ⁻ (ppm)	Parcela Agroecológica	16,0	12,9	80,9
	Parcela Testigo	16,0	10,8	67,7
Azufre (ppm)	Parcela Agroecológica	2,2	2,2	98,5
	Parcela Testigo	1,0	0,0	0,0
Hierro (ppm)	Parcela Agroecológica	75,8	54,5	71,9
	Parcela Testigo	82,2	59,3	72,1

Variable	Tratamiento	Media	Desviación típica	CV (%)
Manganeso (ppm)	Parcela Agroecológica	35,6	33,4	93,8
	Parcela Testigo	29,6	17,9	60,3
Cobre (ppm)	Parcela Agroecológica	0,2	0,2	111,8
	Parcela Testigo	0,3	0,3	77,8
Zinc (ppm)	Parcela Agroecológica	0,1	0,1	63,9
	Parcela Testigo	0,4	0,6	161,5
Boro (ppm)	Parcela Agroecológica	0,2	0,1	63,8
	Parcela Testigo	0,1	0,1	64,0
pH	Parcela Agroecológica	5,3	1,0	19,5
	Parcela Testigo	5,1	0,4	7,2
CE mS/cm	Parcela Agroecológica	0,2	0,0	24,3
	Parcela Testigo	0,1	0,6	43,7
Materia orgánica %	Parcela Agroecológica	3,0	0,4	13,7
	Parcela Testigo	2,6	0,6	25,3
Carbono orgánico (CO %)	Parcela Agroecológica	1,7	0,2	14,6
	Parcela Testigo	1,5	0,4	25,5
Porcentaje de Saturación Bases %	Parcela Agroecológica	62,8	50,5	80,3
	Parcela Testigo	73,6	77,8	105,7
Densidad Aparente (g/cm ³)	Parcela Agroecológica	1,3	0,2	13,2
	Parcela Testigo	1,2	0,1	12,1

Nota. K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Cl: cloro; P: fósforo; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Mo: molibdeno; CO: Carbono orgánico; SB: saturación con bases; DA: densidad aparente.
Fuente: Equipo investigador

El análisis de la comparación entre la parcela agroecológica y el testigo para las variables químicas y físicas del suelo para el modelo NC-C-P no mostró diferencias estadísticas en los parámetros evaluados entre ambos tratamientos (Tabla 33).

Tabla 33

Comparación las variables químicas y físicas del suelo entre la parcela agroecológica y el testigo para para el modelo Nogal Cafetero-Cacao- Plátano (NC-C-P)

Variable agroquímica del suelo	Media Parcela Agroecológica	Media Parcela Testigo	Valor de t	Significación bilateral
Potasio (cmol(+)/kg)	0,4	0,4	-0,5	0,6
Calcio (cmol(+)/kg)	6,7	4,7	0,6	0,6
Magnesio (cmol(+)/kg)	2,3	2,6	-0,2	0,9
Sodio (milimol/L)	0,5	0,2	1,5	0,2
Aluminio (cmol(+)/kg)	1,4	1,6	0,2	0,8
CIC (cmol(+)/kg)	15,0	15,7	-0,2	0,9
Cloruros (meq/100L)	0,5	0,5	0,6	0,6
Fósforo (ppm)	4,6	4,4	0,1	0,9
N-NH ₄ ⁺ (ppm)	30,8	25,0	1,4	0,2
N-NO ₃ ⁻ (ppm)	16,0	16,0	0,0	1,0
Azufre (ppm)	2,2	1,0	1,2	0,3
Hierro (ppm)	75,8	82,2	-0,2	0,9
Manganeso (ppm)	35,6	29,6	0,4	0,7
Cobre (ppm)	0,2	0,3	-0,8	0,4
Zinc (ppm)	0,1	0,4	-0,8	0,4
Boro (ppm)	0,2	0,1	0,4	0,7
pH	5,3	5,1	0,4	0,7
CE mS/cm	0,2	0,1	1,0	0,4
Materia orgánica (%)	3,0	2,6	1,2	0,3
Carbono orgánico (%)	1,7	1,5	1,1	0,3
Saturación con bases (%)	62,8	73,6	-0,3	0,8
Densidad aparente (g/cm ³)	1,3	1,2	0,2	0,9

Nota. K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Cl: cloro; P: fósforo; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Mo: molibdeno; CO: Carbono orgánico; SB: saturación con bases; DA: densidad aparente.
Fuente: Equipo investigador

El análisis de los nutrientes presentes en el suelo a nivel general, de las 30 parcelas estudiadas para el modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M), se presenta en la tabla 31. Los valores más altos corresponden al Fe, Mn, N-NH⁺, P y Ca. En forma general, son valores bajos con excepción del Fe que se encuentra en niveles altos. La mayor variación de los datos corresponde al P, Zinc y a los nitratos, lo que refleja una variabilidad espacial alta (Tabla 34).

Tabla 34

Estadísticos descriptivos de las variables químicas y físicas de los suelos para las 30 parcelas del Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)

Variable	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	Desviación típica	Coefficiente de variación (%)
Potasio (cmol(+)/kg)	0,1	1,2	0,4	0,3	69,8
Calcio (cmol(+)/kg)	1,7	21,9	9,4	6,7	70,8
Magnesio (cmol(+)/kg)	1,3	18,5	6,8	5,4	79,4
Sodio (milimol/L)	0,1	0,4	0,2	0,1	43,0
Aluminio (cmol(+)/kg)	0,0	3,3	0,8	1,3	156,3
CIC (cmol(+)/kg)	6,0	24,8	14,6	5,9	40,8
Cloruros (meq/100 L)	0,5	0,6	0,5	0,1	10,0
Fósforo (ppm)	2,0	66,0	22,2	24,9	112,2
N-NH ⁺ (ppm)	14,0	36,0	26,6	5,9	22,2
N-NO ₃ ⁻ (ppm)	5,0	40,0	11,5	12,7	110,5
Azufre (ppm)	1,0	14,0	6,0	5,2	86,4
Hierro (ppm)	46,0	234,0	107,5	52,7	49,0
Manganeso (ppm)	20,0	129,0	65,5	36,8	56,2
Cobre (ppm)	0,1	0,7	0,3	0,2	71,9
Zinc (ppm)	0,1	0,9	0,2	0,3	117,0
Boro (ppm)	0,1	0,2	0,1	0,0	43,7
pH	4,8	6,2	5,5	0,5	9,1
CE mS/cm	0,1	0,4	0,1	0,1	63,0
Materia orgánica (%)	2,6	3,9	3,2	0,4	13,1

Variable	Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	Desviación típica	Coefficiente de variación (%)
Carbono orgánico (%)	1,6	2,2	1,9	0,2	12,5
Saturación con bases (%)	19,8	281,1	132,1	97,9	74,1
Densidad aparente (g/cm ³)	1,1	1,6	1,3	0,2	11,6

Nota. K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Cl: cloro; P: fósforo; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Mo: molibdeno; CO: Carbono orgánico; SB: saturación con bases; DA: densidad aparente.
Fuente: Equipo investigador

En la tabla 35 se puede observar los resultados promedios encontrados en la concentración de nutrientes en los suelos tanto en la parcela agroecológica como en la parcela testigo correspondiente al modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M). En forma general, la concentración de algunos nutrientes fue relativamente similar en ambas parcelas con excepción del fósforo donde la parcela agroecológica presentó un valor mucho más alto, elemento que a su vez presentó uno de los coeficientes de variación más alto. Es común encontrar coeficientes de variación altos en estas variables de suelos dada la naturaleza heterogénea de los suelos.

Tabla 35

Estadísticos descriptivos de las variables químicas y físicas del suelo para las parcelas agroecológica y testigo del Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz NC-A-M

Variable	Tratamiento	Media	Desviación típica	CV (%)
Potasio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	0,5	0,4	81,2
	Parcela Testigo	0,4	0,2	42,0
Calcio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	10,0	5,2	52,2
	Parcela Testigo	8,8	8,5	96,2
Magnesio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	7,0	3,6	51,3
	Parcela Testigo	6,6	7,3	109,6

Variable	Tratamiento	Media	Desviación típica	CV (%)
Sodio (milimol/L)	Parcela Agroecológica	0,2	0,1	35,8
	Parcela Testigo	0,2	0,1	54,5
Aluminio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	0,1	0,3	208,5
	Parcela Testigo	1,5	1,6	105,2
CIC (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	14,8	7,3	49,4
	Parcela Testigo	14,3	5,1	35,4
Cloruros (meq/100L)	Parcela Agroecológica	0,5	0,1	10,2
	Parcela Testigo	0,5	0,1	9,9
Fósforo (ppm)	Parcela Agroecológica	29,6	30,9	104,3
	Parcela Testigo	14,8	17,5	118,3
N-NH ₄ ⁺ (ppm)	Parcela Agroecológica	26,8	1,8	6,7
	Parcela Testigo	26,4	8,7	32,9
N-NO ₃ ⁻ (ppm)	Parcela Agroecológica	10,0	11,2	111,8
	Parcela Testigo	13,0	15,2	117,3
Azufre (ppm)	Parcela Agroecológica	7,4	5,0	68,0
	Parcela Testigo	4,6	5,5	119,7
Hierro (ppm)	Parcela Agroecológica	106,6	28,8	27,0
	Parcela Testigo	108,4	73,6	67,9
Manganeso (ppm)	Parcela Agroecológica	69,6	28,6	41,1
	Parcela Testigo	61,4	46,8	76,3
Cobre (ppm)	Parcela Agroecológica	0,4	0,2	57,6
	Parcela Testigo	0,3	0,3	95,8
Zinc (ppm)	Parcela Agroecológica	0,3	0,4	109,2
	Parcela Testigo	0,1	0,0	37,3
Boro (ppm)	Parcela Agroecológica	0,1	0,0	43,0
	Parcela Testigo	0,1	0,0	49,5
pH	Parcela Agroecológica	5,5	0,3	5,9
	Parcela Testigo	5,4	0,7	12,3
CE mS/cm	Parcela Agroecológica	0,1	0,1	41,3
	Parcela Testigo	0,2	0,1	81,7
Materia orgánica %	Parcela Agroecológica	3,1	0,2	6,7
	Parcela Testigo	3,3	0,6	17,9
Carbono orgánico (CO %)	Parcela Agroecológica	1,8	0,1	6,3
	Parcela Testigo	1,9	0,3	16,9

Variable	Tratamiento	Media	Desviación típica	CV (%)
Porcentaje de Saturación Bases %	Parcela Agroecológica	153,7	108,8	70,8
	Parcela Testigo	110,7	92,5	83,7
Densidad Aparente (g/cc)	Parcela Agroecológica	1,3	0,2	12,2
	Parcela Testigo	1,2	0,1	11,6

Nota. K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Cl: cloro; P: fósforo; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Mo: molibdeno; CO: Carbono orgánico; SB: saturación con bases; DA: densidad aparente.
Fuente: Equipo investigador

Al comparar los valores promedios de la concentración de elementos en los suelos entre la parcela agroecológica y la testigo no se encontraron diferencias estadísticas entre ambos ($p < 0,05$) (Tabla 36).

Tabla 36

Comparación las variables químicas y físicas del suelo entre la parcela agroecológica y el testigo para para el modelo Nogal Cafetero-Aguacate- Maíz

Variable agroquímica del suelo	Media Parcela Agroecológica	Media Parcela Testigo	Valor de t	Significación bilateral
Potasio (cmol(+)/kg)	0,5	0,4	0,8	0,5
Calcio (cmol(+)/kg)	10,0	8,8	0,3	0,8
Magnesio (cmol(+)/kg)	7,0	6,6	0,1	0,9
Sodio (milimol/L)	0,2	0,2	0,4	0,7
Aluminio (cmol(+)/kg)	0,2	1,5	-1,9	0,1
CIC (cmol(+)/kg)	14,8	14,3	0,1	0,9
Cloruros (meq/100L)	0,5	0,5	-0,9	0,4
Fósforo (ppm)	29,6	14,8	0,9	0,4
N-NH ₄ ⁺ (ppm)	26,8	26,4	0,1	0,9
N-NO ₃ ⁻ (ppm)	10,0	13,0	-0,4	0,7
Azufre (ppm)	7,4	4,6	0,8	0,4
Hierro (ppm)	106,6	108,4	-0,1	0,9
Manganeso (ppm)	69,6	61,4	0,3	0,7
Cobre (ppm)	0,4	0,3	0,5	0,6
Zinc (ppm)	0,3	0,1	1,3	0,2
Boro (ppm)	0,1	0,1	0,2	0,8
pH	5,5	5,4	0,2	0,9
CE mS/cm	0,1	0,2	-0,2	0,8
Materia orgánica (%)	3,1	3,3	-0,4	0,7
Carbono orgánico (%)	1,8	1,9	-0,6	0,6
Saturación con bases (%)	153,7	110,6	0,7	0,5
Densidad aparente (g/cm ³)	1,3	1,2	0,8	0,5

Nota. K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Cl: cloro; P: fósforo; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Mo: molibdeno; CO: Carbono orgánico; SB: saturación con bases; DA: densidad aparente.

Fuente: Equipo investigador

Los suelos de las fincas del modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F) en términos generales presentaron bajas concentraciones de nutrientes, así como un pH promedio ácido. Los coeficientes de variación estuvieron desde 7 % para la densidad aparente del suelo hasta 180% para la concentración de zinc (Tabla 37).

Tabla 37

Estadísticos descriptivos de las variables químicas y físicas para las 30 parcelas del Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	CV (%)
Potasio (cmol(+)/kg)	0,2	0,7	0,4	0,1	35,6
Calcio (cmol(+)/kg)	0,7	17,0	7,7	5,4	70,5
Magnesio (cmol(+)/kg)	0,1	6,0	2,0	1,7	86,5
Sodio (milimol/L)	0,1	1,1	0,5	0,3	68,5
Aluminio (cmol(+)/kg)	0,0	4,3	0,8	1,3	161,1
CIC (cmol(+)/kg)	9,2	23,9	16,0	5,2	32,8
Cloruros (meq/100L)	0,4	0,9	0,6	0,2	26,6
Fósforo (ppm)	2,0	188,0	37,3	58,5	156,7
N-NH ₄ ⁺ (ppm)	6,0	34,0	25,0	8,5	34,0
N- N-NO ₃ ⁻ (ppm)	5,0	60,0	30,5	14,6	47,9
Azufre (ppm)	1,0	12,0	4,6	4,4	94,6
Hierro (ppm)	28,0	103,0	67,7	31,4	46,4
Manganeso (ppm)	5,0	193,0	48,6	53,1	109,3
Cobre (ppm)	0,1	1,9	0,7	0,5	79,5
Zinc (ppm)	0,1	7,8	1,4	2,5	180,3
Boro (ppm)	0,1	0,3	0,1	0,1	66,0
pH	4,7	6,9	5,6	0,8	13,9
CE mS/cm	0,1	0,5	0,2	0,1	47,4
Materia orgánica (%)	1,5	16,7	4,3	4,6	107,0
Carbono orgánico (%)	0,9	9,1	2,4	2,5	102,4
Saturación con bases (%)	5,3	120,1	67,7	39,6	58,5
Densidad aparente (g/cc)	1,1	1,4	1,2	0,1	7,2

Fuente: Equipo investigador

No se observaron diferencias en las variables químicas y físicas de los suelos entre las parcelas agroecológicas con las testigos. Sin embargo, un aumento de la materia orgánica del suelo se observó en la parcela agroecológica con respecto a la testigo. Los coeficientes de variación estuvieron en un intervalo aceptable con excepción del aluminio, el fósforo, el azufre, el manganeso, el cobre, el zinc y la materia orgánica del suelo (Tabla 38).

Tabla 38

Estadísticos descriptivos de las variables químicas y físicas del suelo para las parcelas agroecológica y testigo del modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)

Variable	Tratamiento	Media	Desviación típica	CV (%)
Potasio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	0,4	0,1	21,3
	Parcela Testigo	0,4	0,2	49,9
Calcio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	8,3	4,9	58,9
	Parcela Testigo	7,2	6,5	90,5
Magnesio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	2,7	2,1	80,4
	Parcela Testigo	1,4	1,1	79,2
Sodio (milimol/L)	Parcela Agroecológica	0,4	0,2	59,5
	Parcela Testigo	0,5	0,4	76,5
Aluminio (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	0,4	0,6	149,7
	Parcela Testigo	1,2	1,8	144,7
CIC (cmol(+)/kg)	Parcela Agroecológica	17,7	5,2	29,5
	Parcela Testigo	14,3	5,2	36,7
Cloruros (meq/100L)	Parcela Agroecológica	0,6	0,1	12,5
	Parcela Testigo	0,6	0,2	37,8
Fósforo (ppm)	Parcela Agroecológica	20,6	18,8	91,2
	Parcela Testigo	54,0	81,5	150,9
N-NH ₄ ⁺ (ppm)	Parcela Agroecológica	24,0	11,6	48,3
	Parcela Testigo	26,0	5,1	19,6
N-NO ₃ ⁻ (ppm)	Parcela Agroecológica	30,0	7,1	23,6
	Parcela Testigo	31,0	20,7	66,9
Azufre (ppm)	Parcela Agroecológica	4,2	3,4	81,4
	Parcela Testigo	5,0	5,5	110,5
Hierro (ppm)	Parcela Agroecológica	76,0	23,7	31,2
	Parcela Testigo	59,4	38,5	64,9

Variable	Tratamiento	Media	Desviación típica	CV (%)
Manganeso (ppm)	Parcela Agroecológica	34,8	11,8	34,0
	Parcela Testigo	62,4	75,7	121,3
Cobre (ppm)	Parcela Agroecológica	0,7	0,4	58,0
	Parcela Testigo	0,7	0,7	105,2
Zinc (ppm)	Parcela Agroecológica	0,5	0,6	139,7
	Parcela Testigo	2,3	3,4	146,5
Boro (ppm)	Parcela Agroecológica	0,1	0,1	85,5
	Parcela Testigo	0,2	0,1	53,0
pH	Parcela Agroecológica	5,6	0,8	14,2
	Parcela Testigo	5,6	0,8	15,2
CE $\mu\text{S/cm}$	Parcela Agroecológica	0,2	0,0	10,7
	Parcela Testigo	0,3	0,2	67,3
Materia orgánica %	Parcela Agroecológica	5,7	6,2	107,4
	Parcela Testigo	2,8	1,9	68,0
Carbono orgánico (CO %)	Parcela Agroecológica	3,2	3,3	103,1
	Parcela Testigo	1,6	1,1	68,3
Porcentaje de Saturación Bases %	Parcela Agroecológica	69,4	36,6	52,7
	Parcela Testigo	66,0	46,8	70,8
Densidad Aparente (g/cc)	Parcela Agroecológica	1,2	0,1	6,5
	Parcela Testigo	1,2	0,1	8,1

Nota. K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Cl: cloro; P: fósforo; N-NH_4^+ : nitrógeno disponible como amonio; N-NO_3^- : nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Mo: molibdeno; CO: Carbono orgánico; SB: saturación con bases; DA: densidad aparente.
Fuente: Equipo investigador

El análisis de la comparación entre la parcela agroecológica y el testigo para las variables químicas y físicas del suelo para el modelo (NC-A-F) no mostró diferencias estadísticas en los parámetros evaluados entre ambos tratamientos (Tabla 39).

Tabla 39

Comparación las variables químicas y físicas del suelo entre la parcela agroecológica y el testigo para para el modelo Nogal Cafetero-Aguacate- Frijol (NC-A-F)

Variable agroquímica del suelo	Media Parcela Agroecológica	Media Parcela Testigo	Valor de t	Significación bilateral
Potasio (cmol(+)/kg)	0,4	0,4	0,2	0,8
Calcio (cmol(+)/kg)	8,3	7,2	0,3	0,8
Magnesio (cmol(+)/kg)	2,7	1,4	1,2	0,3
Sodio (milimol/L)	0,4	0,5	-0,6	0,6
Aluminio (cmol(+)/kg)	0,4	1,2	-1,0	0,4
CIC (cmol(+)/kg)	17,7	14,3	1,0	0,3
Cloruros (meq/100L)	0,6	0,6	0,0	1,0
Fósforo (ppm)	20,6	54,0	-0,9	0,4
N-NH ₄ ⁺ (ppm)	24,0	26,0	-0,3	0,7
N-NO ₃ ⁻ (ppm)	30,0	31,0	-0,1	0,9
Azufre (ppm)	4,2	5,0	-0,3	0,8
Hierro (ppm)	76,0	59,4	0,8	0,4
Manganeso (ppm)	34,8	62,4	-0,8	0,4
Cobre (ppm)	0,7	0,7	0,1	1,0
Zinc (ppm)	0,5	2,3	-1,2	0,3
Boro (ppm)	0,1	0,2	-1,0	0,3
pH	5,6	5,6	0,1	1,0
CE mS/cm	0,2	0,3	-0,3	0,8
Materia orgánica (%)	5,7	2,8	1,0	0,3
Carbono orgánico (%)	3,2	1,6	1,0	0,3
Saturación con bases (%)	69,4	66,0	0,1	0,9
Densidad aparente (g/cm ³)	1,2	1,2	-0,8	0,5

Nota. K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Cl: cloro; P: fósforo; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Mo: molibdeno; CO: Carbono orgánico; SB: saturación con bases; DA: densidad aparente.
Fuente: Equipo investigador

De acuerdo con los resultados estadísticos presentados en la Tabla 40, en el modelo agroecológico Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M), solamente se observaron diferencias ($p < 0,05$) en la concentración de Mn, Cu, pH y conductividad eléctrica. Se observó una disminución significativa en la concentración de Mn luego del establecimiento de los modelos, mientras que el Cu aumentó. El pH y la CE por su parte disminuyeron al año de establecidos los cultivos.

Tabla 40

Comparación de las variables químicas y físicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela agroecológica en el modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)

Variable	Valor promedio antes	Valor promedio antes	T student	Significancia Bilateral ($P < 0,05$)
K (cmol(+)/kg)	0,3	0,5	-0,9	0,4
Ca (cmol(+)/kg)	10,3	10,0	-0,9	0,4
Mg (cmol(+)/kg)	7,2	7,0	0,1	0,9
Na (cmol(+)/kg)	0,3	0,2	0,9	0,9
Al (cmol(+)/kg)	0,6	0,2	0,1	0,9
CIC (cmol(+)/kg)	16,8	14,8	0,1	0,9
Cl (cmol(+)/kg)	0,9	0,5	0,2	0,9
P (ppm)	14,0	29,6	0,2	0,9
NH ₄ ⁺ (ppm)	12,4	26,8	0,7	0,5
NO ₃ ⁻ (ppm)	39,0	10,0	0,7	0,5
S (ppm)	7,2	7,4	0,4	0,7
Fe (ppm)	108,2	106,6	0,4	0,7
Mn (ppm)	98,4	69,6	3,3	0,0
Cu (ppm)	0,2	0,4	3,3	0,0
Zn (ppm)	3,8	0,3	-1,0	0,3
B (ppm)	0,3	0,1	-1,0	0,3
pH	5,6	5,5	-5,2	0,0
CE (dS/m)	0,3	0,1	-5,2	0,0
Mo (ppm)	3,6	3,1	1,2	0,3
CO (%)	2,1	1,8	1,2	0,3
SB (%)	160,7	153,7	-0,1	0,9
DA (g/cm ³)	1,2	1,3	-0,1	0,9

Fuente: Equipo investigador

Al comparar los valores medios de las variables químicas y físicas del suelo antes y después del establecimiento del modelo agroecológico Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M) no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Tabla 41).

Tabla 41

Comparación de las variables químicas y físicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela testigo del modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)

Variable	Valor promedio antes	Valor promedio después	T student	Significancia Bilateral ($P < 0,05$)
K (cmol(+)/kg)	0,3	0,4	-0,9	0,4
Ca (cmol(+)/kg)	7,6	8,8	-0,3	0,8
Mg (cmol(+)/kg)	7,4	6,6	0,2	0,8
Na (cmol(+)/kg)	0,1	0,2	-1,2	0,3
Al (cmol(+)/kg)	0,4	1,5	-1,3	0,2
CIC (cmol(+)/kg)	12,6	14,3	-0,5	0,6
Cl (cmol(+)/kg)	0,8	0,5	1,7	0,1
P (ppm)	10,4	14,8	-0,4	0,7
NH ₄ ⁺ (ppm)	15,2	26,4	-1,9	0,1
NO ₃ ⁻ (ppm)	6,0	13,0	-1,0	0,3
S (ppm)	1,4	4,6	-1,3	0,2
Fe (ppm)	108,0	108,4	-0,0	0,9
Mn (ppm)	140,6	61,4	1,1	0,3
Cu (ppm)	0,2	0,3	-0,5	0,6
Zn (ppm)	4,9	0,1	1,7	0,1
B (ppm)	0,2	0,1	1,7	0,1
pH	5,9	5,4	1,1	0,3
CE (dS/m)	0,1	0,2	-0,2	0,8
Mo (ppm)	3,0	3,3	-1,0	0,3
CO (%)	1,7	1,9	-1,3	0,2
SB (%)	193,6	110,6	0,8	0,4
DA (g/cm ³)	2,5	1,2	1,0	0,3

Fuente: Equipo investigador

Al comparar las variables químicas y físicas de la parcela agroecológica del modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P) antes y después de la implementación de los modelos no se encontró diferencias estadísticas entre éstas (Tabla 42).

Tabla 42

Comparación de las variables químicas y físicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela agroecológica del modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P)

Variable	Valor promedio antes	Valor promedio antes	T student	Significancia Bilateral ($P < 0,05$)
K (cmol(+)/kg)	0,4	0,4	0,4	0,7
Ca (cmol(+)/kg)	4,0	6,7	-0,8	0,7
Mg (cmol(+)/kg)	1,8	2,3	-0,3	0,5
Na (cmol(+)/kg)	0,1	0,5	-0,3	0,5
Al (cmol(+)/kg)	1,6	1,4	-2,0	0,8
CIC (cmol(+)/kg)	16,0	15,0	-2,0	0,8
Cl (cmol(+)/kg)	0,6	0,5	0,2	0,1
P (ppm)	2,2	4,6	0,2	0,1
NH ₄ ⁺ (ppm)	10,0	30,8	0,3	0,9
NO ₃ ⁻ (ppm)	9,0	16,0	0,3	0,9
S (ppm)	1,8	2,2	1,7	0,8
Fe (ppm)	70,6	75,8	1,7	0,8
Mn (ppm)	22,8	35,6	-1,1	0,1
Cu (ppm)	0,3	0,2	-1,1	0,1
Zn (ppm)	0,7	0,1	-4,7	0,3
B (ppm)	0,2	0,2	-4,7	0,3
pH	5,1	5,3	-1,1	0,0
CE (dS/m)	0,2	0,2	-1,1	0,0
Mo (ppm)	3,6	3,0	-0,4	0,3
CO (%)	2,1	1,7	-0,4	0,3
SB (%)	44,0	62,8	-0,7	0,7
DA (g/cm ³)	1,2	1,3	-0,5	0,7

Fuente: Equipo investigador

La comparación de las variables químicas antes y después de establecido del cultivo arrojó unas diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para el fósforo y el nitrato cuyos valores fueron mucho más altos después del establecimiento de los modelos (Tabla 43).

Tabla 43

Comparación de las variables químicas y físicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela testigo del modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P)

Variable	Valor promedio antes	Valor promedio antes	T student	Significancia Bilateral ($P < 0,05$)
K (cmol(+)/kg)	0,4	0,4	-0,4	0,7
Ca (cmol(+)/kg)	2,6	4,7	-1,1	0,3
Mg (cmol(+)/kg)	0,9	2,6	-1,5	0,2
Na (cmol(+)/kg)	0,6	0,2	0,9	0,4
Al (cmol(+)/kg)	2,8	1,2	1,2	0,3
CIC (cmol(+)/kg)	13,4	15,7	-0,6	0,6
Cl (cmol(+)/kg)	1,0	0,5	2,2	0,1
P (ppm)	1,2	4,4	-2,7	0,0
NH ₄ ⁺ (ppm)	9,4	25,0	-3,0	0,1
NO ₃ ⁻ (ppm)	6,0	16,0	-2,0	0,0
S (ppm)	15,2	1,0	1,1	0,1
Fe (ppm)	64,6	82,2	-0,4	0,3
Mn (ppm)	18,8	29,6	-0,8	0,7
Cu (ppm)	0,3	0,3	-0,3	0,4
Zn (ppm)	0,7	0,4	0,8	0,7
B (ppm)	0,1	0,1	-0,1	0,5
pH	5,3	5,1	0,5	0,9
CE (dS/m)	0,2	0,1	1,3	0,6
Mo (ppm)	2,8	2,6	0,7	0,6
CO (%)	1,6	1,5	0,6	0,2
SB (%)	42,8	73,6	-0,7	0,5
DA (g/cm ³)	1,3	1,2	0,8	0,6

Fuente: Equipo investigador

No se observaron diferencias significativas en la comparación de las variables químicas y físicas de los suelos antes y después de la implementación del modelo NC-A-F (Tabla 44).

Tabla 44

Comparación de las variables químicas y físicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela agroecológica del modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)

Variable	Valor promedio antes	Valor promedio después	T student	Significancia Bilateral ($P < 0,05$)
K (cmol(+)/kg)	0,5	0,4	0,5	0,7
Ca (cmol(+)/kg)	6,1	8,6	-0,7	0,5
Mg (cmol(+)/kg)	1,3	2,7	-1,3	0,2
Na (cmol(+)/kg)	0,6	0,4	0,7	0,5
Al (cmol(+)/kg)	0,5	0,4	0,1	0,9
CIC (cmol(+)/kg)	19,2	17,7	0,5	0,7
Cl (cmol(+)/kg)	1,2	0,6	1,9	0,1
P (ppm)	51,4	20,6	1,3	0,2
NH ₄ ⁺ (ppm)	17	24	-1,0	0,3
NO ₃ ⁻ (ppm)	39	30	0,5	0,6
S (ppm)	23,2	4,2	1,7	0,2
Fe (ppm)	160,8	76	1,2	0,3
Mn (ppm)	74,8	34,8	1,5	0,2
Cu (ppm)	0,8	0,7	0,2	0,9
Zn (ppm)	8,6	0,5	2,0	0,1
B (ppm)	0,2	0,1	0,9	0,4
pH	5,6	5,6	0,1	0,9
CE (dS/m)	0,6	0,2	1,9	0,1
Mo (ppm)	2,9	5,7	-1,0	0,3
CO (%)	1,7	3,2	-1,0	0,3
SB (%)	44,2	69,4	-1,2	0,3
DA (g/cm ³)	1,2	1,2	0,5	0,7

Nota. K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Cl: cloro; P: fósforo; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Mo: molibdeno; CO: Carbono orgánico; SB: saturación con bases; DA: densidad aparente.
Fuente: Equipo investigador

En la parcela testigo tampoco se evidenció diferencias estadísticas en las variables químicas y físicas de los suelos luego del establecimiento modelo NC-A-F en las parcelas testigos (Tabla 45).

Tabla 45

Comparación de las variables químicas y físicas de los suelos antes y después de establecimiento de los cultivos en la parcela testigo del modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)

Variable	Valor promedio antes	Valor promedio antes	T student	Significancia Bilateral ($P < 0,05$)
K (cmol(+)/kg)	0,3	0,4	-0,5	0,6
Ca (cmol(+)/kg)	7,3	7,2	0,0	0,9
Mg (cmol(+)/kg)	1,6	1,4	0,3	0,8
Na (cmol(+)/kg)	0,7	0,5	0,4	0,7
Al (cmol(+)/kg)	0,7	1,2	-0,7	0,5
CIC (cmol(+)/kg)	14,8	14,3	0,1	0,9
Cl (cmol(+)/kg)	1,2	0,6	1,5	0,2
P (ppm)	26,2	54	-0,7	0,5
NH ₄ ⁺ (ppm)	13,2	26	-2,1	0,1
NO ₃ ⁻ (ppm)	37	31	0,3	0,8
S (ppm)	20	5	1,2	0,3
Fe (ppm)	59,4	59,4	0	1
Mn (ppm)	38,8	62,4	-0,6	0,5
Cu (ppm)	0,38	0,7	-0,9	0,4
Zn (ppm)	3,0	2,3	0,4	0,7
B (ppm)	0,2	0,2	0,1	0,9
pH	5,8	5,6	0,4	0,7
CE (dS/m)	0,4	0,3	0,9	0,4
Mo (ppm)	2,8	2,8	-0,0	0,9
CO (%)	1,6	1,6	-0,0	0,9
SB (%)	62,2	66,0	-0,2	0,9
DA (g/cm ³)	1,3	1,2	0,9	0,4

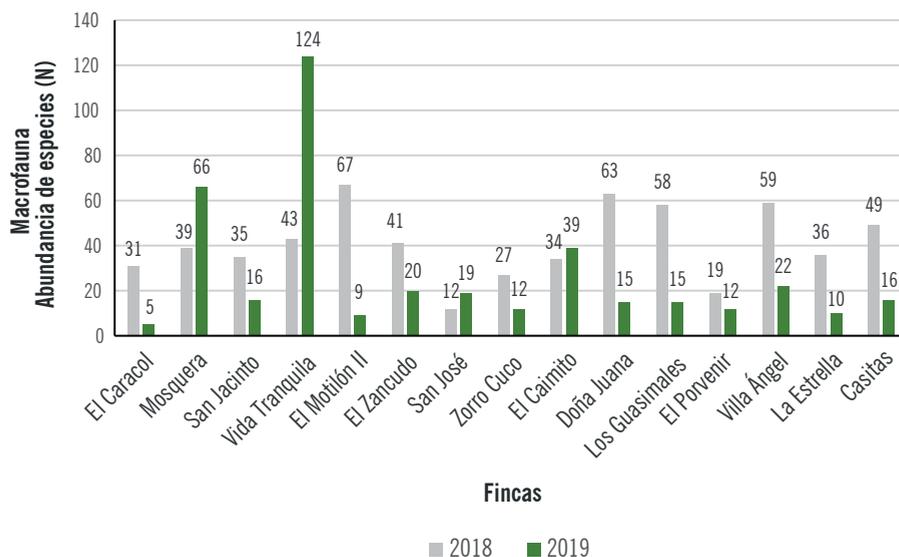
Nota. K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Na: sodio; Al: aluminio; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Cl: cloro; P: fósforo; N-NH₄⁺: nitrógeno disponible como amonio; N-NO₃⁻: nitrógeno disponible como nitrato; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Cu: cobre; Zn: zinc; B: boro; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Mo: molibdeno; CO: Carbono orgánico; SB: saturación con bases; DA: densidad aparente.
Fuente: Equipo investigador

3.11 Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la abundancia de especies de la macrofauna del suelo

La abundancia de especies de la macrofauna del suelo en las 15 fincas en las cuales se implementó los diferentes modelos agroecológicos se comparó antes de la implementación de éstos. De acuerdo con la figura 13, se cuantificó una abundancia total de 613 individuos en el año 2018 (estado inicial), mientras que, en el año 2019, luego de establecer los modelos la abundancia total disminuyó a 400 individuos. En la mayoría de las fincas este valor disminuyó con excepción de las fincas 4, 12 y 14.

Figura 13

Abundancia de especies (N) de la macrofauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander



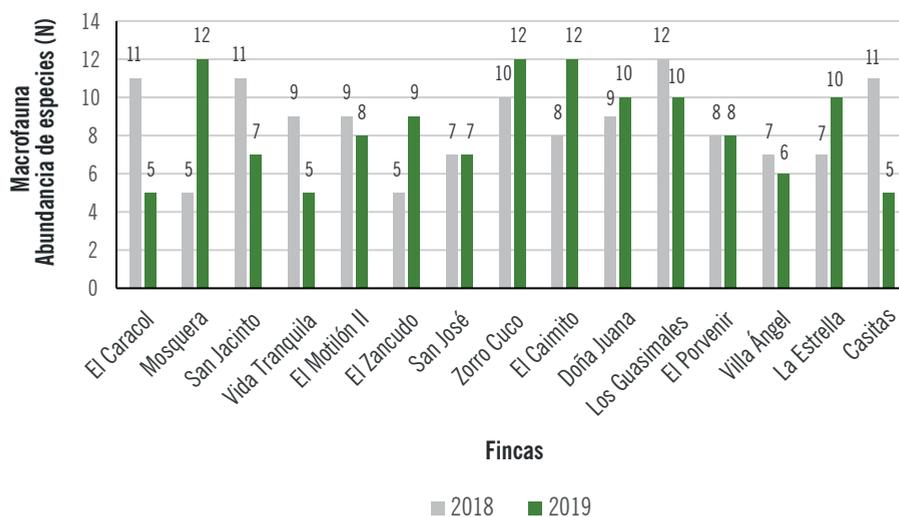
Nota. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M): Fincas El Caracol, Mosquera, San Jacinto, Vida Tranquila. Modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P): Fincas El Zancudo, San José, Zorro Cuco, El Cairmito, Doña Juana. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F): Fincas Los Guasimales, El Porvenir, Villa Ángel, La Estrella, Casita. *Fuente:* Equipo investigador

3.12 Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la riqueza específica de especies (S) de la macrofauna del suelo

En términos generales la riqueza específica de especies (S) total encontrada en las quince fincas fue de 129 antes del inicio del experimento y un año después (2019), ésta disminuyó a 126 individuos. Al comparar entre fincas puede apreciarse un comportamiento irregular en cuanto a esa variable (Figura 14).

Figura 14

Riqueza específica de especies (S) de la macrofauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander



Nota. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M): Fincas El Caracol, Mosquera, San Jacinto, Vida Tranquila. Modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P): Fincas El Zancudo, San José, Zorro Cuco, El Caimito, Doña Juana. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F): Fincas Los Guasimales, El Porvenir, Villa Ángel, La Estrella, Casita. *Fuente:* Equipo investigador

3.13 Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre los índices de biodiversidad de la macrofauna del suelo por modelo agroecológico

Se calcularon diferentes índices de biodiversidad con el fin de estimar el impacto de los modelos sobre la macro, meso y microfauna del suelo. En la tabla 46 se puede apreciar que la abundancia (N), la riqueza (S) y el índice de diversidad de Margalef disminuyeron en los tres modelos evaluados en el año 2019, con respecto al 2018, es decir, que la macrofauna fue muy sensible a los cambios generados durante ese primer año de implementación de los modelos. El índice de equidad de Shannon-Wiener (H') tuvo un aumento importante en el modelo NC-A-M en el 2019 con respecto al 2018 mientras que en los modelos NC-C-P y NC-A-F disminuyó a la mitad en el año 2019. El índice de dominancia (Simpson) por su parte, tuvo un aumento importante en el modelo NC-A-M y NC-A-F mientras que en NC-C-P disminuyó (Tabla 46).

Tabla 46

Riqueza específica de especies (S) de la macrofauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander

Índice de biodiversidad de la macrofauna	Modelo (NC-A-M)		Modelo (NC-C-P)		Modelo (NC-A-F)	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Abundancia (N)	241	106	302	75	242	220
Riqueza específica (S)	58	40	56	32	56	30
Diversidad de especies de Margalef (DMg)	10,6	8,6	9,8	7,3	10,2	5,6
Equidad de Shannon-Wiener (H')	3,4	8,6	3,3	1,8	3,7	1,3
Dominancia (Simpson)	0,1	3,1	0,1	0,0	0,0	0,6

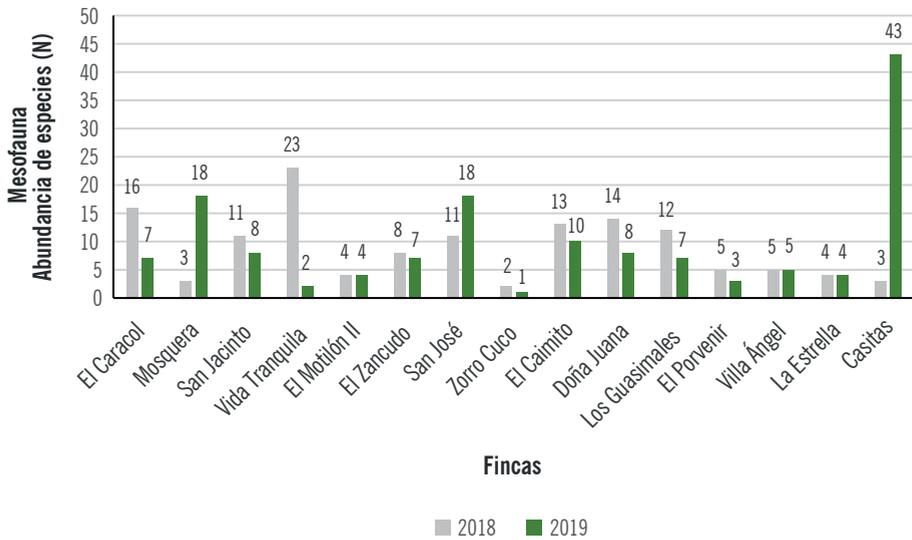
Fuente: Equipo investigador

3.14 Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la abundancia de especies de la mesofauna del suelo por finca

La abundancia de especies de la mesofauna del suelo encontrada al inicio del experimento fue de 134 individuos, un año después este número se incrementó a 145 especies. Con excepción de las fincas 2, 10 y 12, la abundancia tendió a disminuir posterior a la implementación de los modelos (Figura 15).

Figura 15

Abundancia de especies (N) de la mesofauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander



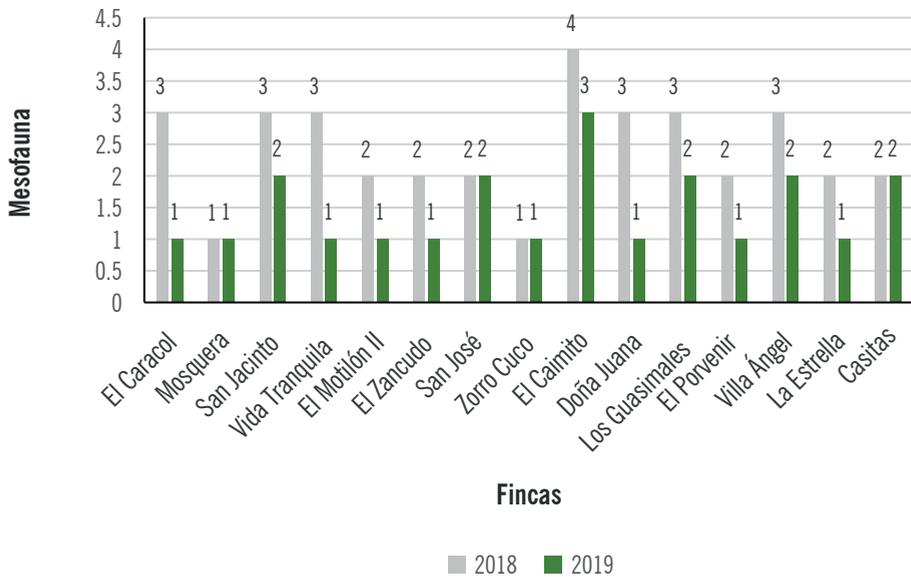
Nota. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M): Fincas El Caracol, Mosquera, San Jacinto, Vida Tranquila. Modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P): Fincas El Zancudo, San José, Zorro Cuco, El Caimito, Doña Juana. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F): Fincas Los Guasimales, El Porvenir, Villa Ángel, La Estrella, Casita. *Fuente:* Equipo investigador

3.15 Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la riqueza específica de especies (S) de la mesofauna del suelo por finca

La riqueza específica de especies (S) encontrada en la mesofauna del suelo de las quince fincas fue de 36 antes del establecimiento de los modelos, al año siguiente este número se redujo a 22 individuos (Figura 16).

Figura 16

Riqueza específica de especies (N) de la mesofauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander



Nota. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M): Fincas El Caracol, Mosquera, San Jacinto, Vida Tranquila. Modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P): Fincas El Zancudo, San José, Zorro Cuco, El Caimito, Doña Juana. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F): Fincas Los Guasimales, El Porvenir, Villa Ángel, La Estrella, Casita. *Fuente:* Equipo investigador

3.16 Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre los índices de biodiversidad de la mesofauna del suelo por modelo agroecológico

En la tabla 47 se puede observar una disminución de la abundancia en los modelos NC-A-M y NC-A-F en el año 2019 con respecto al 2018, mientras que en el modelo NC-C-P la abundancia de especies se incrementó al doble en el año 2019. La diversidad de especies varió poco entre el año 2018 y 2019 en los tres modelos. El índice de equidad de Shannon-Wiener (H') y dominancia de Simpson aumentaron en el 2019 para el modelo NC-A-M, en tanto que en los otros dos modelos no presentó una variación importante entre años.

Tabla 47

Índices de biodiversidad global de la mesofauna del suelo por modelo agroecológico en el municipio de Ocaña, Norte de Santander

Índice de biodiversidad de la macrofauna	Modelo (NC-A-M)		Modelo (NC-C-P)		Modelo (NC-A-F)	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Abundancia (N)	48	44	29	62	57	39
Riqueza específica (S)	4	4	3	3	4	4
Diversidad de especies de Margalef (DMg)	1,0	1,1	0,9	0,7	1,0	1,1
Equidad de Shannon-Wiener (H')	1,2	3,1	1,0	1,0	1,2	1,2
Dominancia (Simpson)	0,3	10,3	0,4	0,4	0,3	0,3

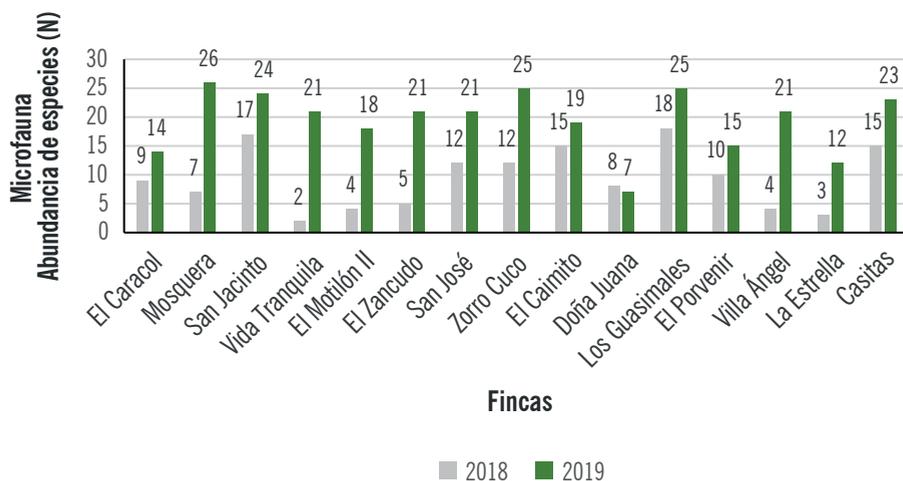
Fuente: Equipo investigador

3.17 Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre la abundancia de especies de la microfauna del suelo por finca

La abundancia de especies de la microfauna del suelo presentó un aumento importante al año del establecimiento de los modelos agroecológicos. Antes del establecimiento de los modelos la abundancia fue de 141 individuos y al año se incrementó a más del doble (292 individuos). Este incremento se observó en todas las fincas con excepción de la finca 5 (Figura 17).

Figura 17

Abundancia de especies (N) de la microfauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander



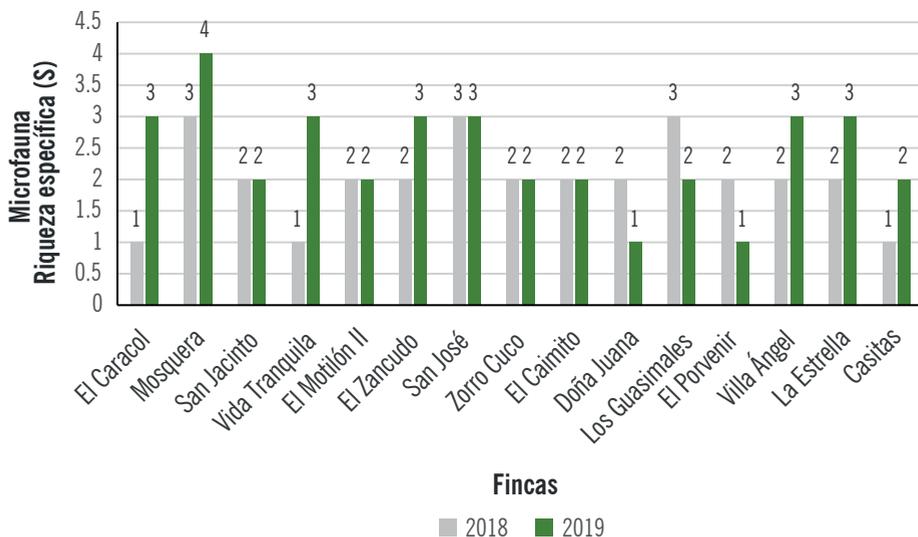
Nota. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M): Fincas El Caracol, Mosquera, San Jacinto, Vida Tranquila. Modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P): Fincas El Zancudo, San Jos6, Zorro Cuco, El Caimito, Doña Juana. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F): Fincas Los Guasimales, El Porvenir, Villa ngel, La Estrella, Casita. *Fuente:* Equipo investigador

3.18 Influencia de la implementaci6n de los modelos agroecol6gicos sobre la riqueza específica de especies (S) de la microfauna del suelo por fincas

La riqueza específica de especies (S) aument6 ligeramente de 30 a 36 luego de la implementaci6n de los modelos en la mayoría de las fincas con excepci6n de las fincas 5, 6 y 7 (Figura 18).

Figura 18

Riqueza específica de especies (N) de la mesofauna del suelo presente en las quince fincas participantes en el proyecto antes y después de implementar los modelos agroecológicos en el municipio Ocaña, Norte de Santander



Nota. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M): Fincas El Caracol, Mosquera, San Jacinto, Vida Tranquila. Modelo Nogal Cafetero-Cacao-Plátano (NC-C-P): Fincas El Zancudo, San José, Zorro Cuco, El Caimito, Doña Juana. Modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F): Fincas Los Guasimales, El Porvenir, Villa Ángel, La Estrella, Casita. *Fuente:* Equipo investigador

3.19 Influencia de la implementación de los modelos agroecológicos sobre los índices de biodiversidad de la microfauna del suelo por modelo agroecológico

Un aumento importante de la abundancia de especies se pudo observar en los tres modelos en el año 2019 con respecto al 2018. La riqueza específica (S) se mantuvo casi igual en los tres modelos entre ambos años. El índice de diversidad de especies de Margalef (DMg) disminuyó en los modelos NC-A-M y NC-C-P y aumentó en NC-A-F. El índice de equidad de Shannon-Wiener (H') disminuyó en NC-A-M y

aumentó en NC-C-P y NC-A-F. El índice de dominancia (Simpson) presentó un ligero aumento en los modelos NC-A-M y NC-C-P y una disminución en NC-A-F al año del establecimiento de los modelos (Tabla 48).

Tabla 48

Índices de biodiversidad global de la microfauna del suelo en el modelo Nogal Cafetero-Aguacate-Maíz en el municipio de Ocaña, Norte de Santander

Índice de biodiversidad de la macrofauna	Modelo (NC-A-M)		Modelo (NC-C-P)		Modelo (NC-A-F)	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Abundancia (N)	52	93	50	96	39	103
Riqueza específica (S)	4	3	3	3	4	8
Diversidad de especies de Margalef (DMg)	1,0	0,7	0,8	0,7	1,1	1,7
Equidad de Shannon-Wiener (H')	1,2	1,0	0,5	1,0	1,1	1,8
Dominancia (Simpson)	0,3	0,4	0,9	0,4	0,4	0,2

Fuente: Equipo investigador

CONCLUSIONES GENERALES

En colaboración con los agricultores y considerando la adaptabilidad y el potencial productivo, así como las oportunidades de comercialización, se eligieron cultivos específicos para los tres modelos agroecológicos implementados en las 15 fincas. Como cultivo forestal permanente, se seleccionó el Nogal Cafetero. Como cultivos semipermanentes, se optó por el aguacate y el cacao y como cultivos transitorios, se decidieron el maíz y el frijol.

El municipio de Ocaña se caracteriza por su paisaje montañoso y de lomerío, ambos expuestos a procesos de erosión debido a condiciones denudacionales. El clima varía entre húmedo en las zonas montañosas y seco en las áreas de lomerío. Los factores clave para la formación del suelo son el clima, el material parental y la pendiente, los cuales influyen en la relación entre el paisaje y el suelo. Esto da como resultado suelos con presencia o ausencia de fragmentos de roca superficial y/o profunda, baja fertilidad natural y diversas características texturales. Desde una perspectiva taxonómica, se identifican suelos entisoles e inceptisoles, indicando suelos jóvenes.

Es fundamental considerar las propiedades del suelo y las características climáticas al establecer los sistemas agroecológicos definidos. Algunas áreas mostraron una fertilidad natural muy baja, mientras que otras presentaron niveles elevados de elementos. Esto puede atribuirse a prácticas pasadas de fertilización y enmiendas químicas, sin considerar las necesidades nutricionales de los cultivos ni la disponibilidad en el suelo. Por lo tanto, se requiere un manejo localizado para abordar la variabilidad en las propiedades químicas y físicas del suelo.

Las similitudes en la macro, meso y microfauna del suelo se deben a la variación en la humedad aparente, distinguiendo zonas secas de aquellas con mayor humedad debido a pendientes bajas que retienen agua, promoviendo un microclima propicio para especies que contribuyen al ciclo de nutrientes.

Los modelos agroecológicos tuvieron un impacto limitado en los elementos agroquímicos del suelo en comparación con las parcelas de control, excepto en el pH y la conductividad eléctrica, que disminuyeron después de un año de cultivo. Además, aumentaron los niveles de materia orgánica en el suelo después del primer año de cultivo.

La implementación de los modelos agroecológicos resultó en un aumento en la abundancia de especies después del primer año, pero también condujo a una disminución en los índices de diversidad de Margalef, abundancia de Shannon-Wiener y dominancia de Simpson en la macrofauna, mesofauna y microfauna del suelo. La riqueza específica fue baja, lo que indica una disminución en la actividad biológica del suelo debido a la preparación del terreno para el establecimiento de los cultivos.

Los modelos agroecológicos impactaron positivamente en las fincas gracias a su enfoque agroforestal, la incorporación de tecnologías de la información y comunicación, y técnicas de agricultura de precisión. Sin embargo, algunos modelos fueron más exitosos que otros en diferentes condiciones edafoclimáticas, especialmente en términos de población lograda, desarrollo de las plantaciones y producción inminente. Destacan los modelos Nogal Cafetero-Cacao-Plátano y Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol en el municipio de Ocaña.

RECOMENDACIONES

- Continuar colaborando con los agricultores para elegir cultivos en función de su adaptabilidad y potencial productivo, manteniendo un enfoque en las oportunidades de mercado.
- Personalizar las estrategias de manejo de suelos y cultivos según las características específicas de cada zona, considerando la variabilidad en propiedades químicas y físicas.
- Adaptar las prácticas agrícolas a los factores climáticos locales, aprovechando la humedad y minimizando la erosión en áreas montañosas y de lomerío.
- Ampliar la implementación de prácticas agroecológicas para mejorar la salud del suelo y promover la biodiversidad en la microfauna y macrofauna del suelo.
- Establecer un sistema de monitoreo regular para evaluar los cambios en los elementos agroquímicos del suelo y ajustar las prácticas en consecuencia.
- Fomentar la diversificación de cultivos como una estrategia para aumentar la abundancia y diversidad de especies en el suelo, contribuyendo al ciclo de nutrientes.
- Implementar un enfoque localizado de manejo de suelos y cultivos para abordar la variabilidad y optimizar la utilización de recursos disponibles en diferentes áreas.
- Realizar actividades y talleres para promover la colaboración entre agricultores, incentivando la creación de asociaciones y cooperativas.
- Proporcionar capacitación continua en prácticas agroecológicas, manejo de cultivos y técnicas de conservación del suelo para maximizar los beneficios a largo plazo.
- Reconocer la importancia de adaptar los modelos agroecológicos a las condiciones edafoclimáticas específicas, considerando la variedad de resultados en diferentes áreas.

- Comunicar los casos exitosos, como los modelos Nogal Cafetero-Cacao-Plátano y Nogal Cafetero-Aguacate-Frijol, para inspirar a otros agricultores y comunidades a adoptar prácticas similares.
- Continuar integrando tecnologías de la información y comunicación para optimizar el manejo de cultivos y la toma de decisiones.
- Proporcionar acompañamiento y asistencia a los agricultores a lo largo de todo el proceso, desde la implementación hasta la producción efectiva de cultivos.

REFERENCIAS

- Ahmad W., Watts MJ., Imtiaz M., Ahmed I. & Zia MH. (2012). Zinc Deficiency in Soils, Crops and Humans: A Review. *Agrochimica -Pisa- LVI(2):65-97.*
- Ahmad W., Zia MH., Malhi, SS., Niaz A. & Saifullah S. (2012). Boron Deficiency in Soils and Crops: A Review. In (Ed.), *Crop Plant. IntechOpen.* <https://doi.org/10.5772/36702>
- Ali A., Yan ER., ChenH.YH., ChangS.X., Zhao YT., Yang XD. & Xu MS. (2016). Stand structural diversity rather than species diversity enhances aboveground carbon storage in secondary subtropical forests in Eastern China. *Biogeosciences* 13, 4627-4635. [https://doi.org/10.5194/bg-13-4627-2016.](https://doi.org/10.5194/bg-13-4627-2016)
- Altieri MA. (2004). Bases agroecológicas para una producción agrícola sustentable. *Agricultura Técnica* 54(4): 371-386.
- Altieri MA. & Nicholls C. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas.* 2007/1. URL: http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=457&Id_Categoria=1&tipo=portada)
- Altieri MA. & Rosset P. (1996). Agroecology and the conversion of largescale conventional systems to sustainable management. *International Journal of Environmental Studies* 50: 165-185.
- Álvarez-Sánchez ME., Maldonado-Torres R., Nájera-Rosas C., Cristóbal-Acevedo D. (2021). Agroecological management for the restoration of soil quality. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas,* 11(4): 741-752.
- Amett R, & Thomas M. (2000). American beetles Achostemata, Myxophaga, Adephaga, Polyphaga: Staphyliniformia. Nort America: CRC Press.

- Arias, JA. (2001). Suelos tropicales. San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a distancia (EUNED). Primera edición.
- Arshad MA, & Coen, GM. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(1 & 2): 25-31.
- Aryal DR., Morales-Ruiz, DE., López-Cruz, S. et al. (2022). *Silvo-pastoral systems and remnant forests enhance carbon storage in livestock-dominated landscapes in Mexico*. *Sci Rep* 12, 16769 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21089-4>
- sfaw A. & Zewudie S. (2021). *Soil macrofauna abundance, biomass and selected soil properties in the home garden and coffee-based agroforestry systems at Wondo Genet, Ethiopia*. *Environmental and Sustainability Indicators*, 12: 100153. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100153>.
- Bache B., Chesworth W., Chesworth W., Gessa C. & Lewis DT. (2008) *Bulk Density*. 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_80
- Benedetti A. & Dilly O. (2006). Approaches to defining, monitoring, evaluating and managing soil quality. Editado por: Bloem J, Hopkins D & Benedetti A. CABI Publishing, CAB International, 317 pp
- Bongers T. & Ferris H. (1999). Nematode community structure as a biomonitor in environmental monitoring. *Trends in Ecology and Evolution*, 14:224-228.
- Brady, NC. & Weil, RR. (2002). *The Nature and Properties of Soils*. New Jersey: Prentice Hall, 960 pp.
- Bünemann EK, Bongiorno G, Baic Z, Creamer E., De Deyn G, Goede R, Fleskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mäder P, Pulleman M, Sukkelf W, van Groenigen JW, Brussaard L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120: 105–125.

- Buol SW., Hole FD. & McCracken RJ. (1981). Génesis y clasificación de suelos. Editorial Trillas. México.
- Burns RG., Nannipieri P., Benedetti A. & Hopkins DW. (2006). Defining soil quality for a sustainable environment. En: Microbiological methods for assessing soil quality. Editado por: Bloem J, Hopkins D & Benedetti A. CABI Publishing, CAB International, 317 pp.
- Çal S. & Barik K. (2020). Hydraulic Conductivity Values of Soils in Different Soil Processing Conditions. *Alinteri Journal of Agriculture Sciences*, 35(1): 132-138. doi: 10.28955/alinterizbd.740904
- Carvajal-Agudelo BN., Andrade HJ. (2020). *Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. Orinoquia*. 24(1): 13-22. <http://doi.org/10.22579/20112629.587>
- Carvalho J. (1972). Mirideos Neotropicales CXLVI: Genero Monaloh-S., 1853 (Hemiptera). Museu Nacional, Rio de Janeiro GB.
- Casanova-Lugo F., Petit-Aldana J. & Solorio-Sánchez, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(1): 5-118.
- Castañeda-Vildosola, A., Valdez-Carrasco, J., Equihua- Martínez, A., Gonzales-Hernández, H., Romero-Napoles, J., Solis-Aguilar, J., & Ramírez-Alarcon, S. (2007). Systematics, Morphology an Physiology Genitalia de tres especies de *Helipus* German (Coleoptera: Curculionidae) que dañan frutos de aguacate (*Perseaamericana* mill) en Mexico y Costarica. *Neotropical Entomology*, 914-918.
- CATIE. (2011). Manejo agroecológico como ruta para lograr la sostenibilidad de fincas con café y ganadería. Editores: Villanueva C., Sepúlveda LC. & Ibrahim M. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE Turrialba, Costa Rica, 260 pp.
- Chavarria DN., Pérez-Brandan C., Serri DL., Meriles JM., Restovich SB., Andriulo AE., Jacquelin L. & Vargas-Gil S. (2018). *Response*

- SB., Andriulo AE., Jacquelin L. & Vargas-Gil S. (2018). *Response of soil microbial communities to agroecological versus conventional systems of extensive agriculture*. *Agric. Ecosyst. Environ.* 264, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.008>
- Chen W., He ZL., Yang XE., Mishra S & Stoffella PJ. (2010) Chlorine Nutrition Of Higher Plants: Progress And Perspectives, *Journal of Plant Nutrition*, 33:7, 943-952, DOI: 10.1080/01904160903242417
- Chesworth W. et al. (2008) Conductivity, Hydraulic. 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_125
- Chesworth W., Perez-Alberti A., Arnaud E., Morel-Seytoux HJ., Morel-Seytoux HJ. (2008) Infiltration. 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_291
- Christoph-Martin G. (2019). Chloride in soil: From nutrient to soil pollutant, *Environmental and Experimental Botany*, 157: 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.10.035>.
- Clavijo NL. (2004). Evaluación de conocimiento agroecológico en horticultores orgánicos y convencionales de la zona norte de Cartago, Costa Rica *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 58: 37-48.
- Colombo C., Palumbo G., He Ji-Zh., Pinton Ro., & Cesco, S. (2013) Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes.
- Dahlgren RA., Macías F., Camps M., Chesworth W., Robarge WP., Bache B. & Emerson WW. (2008) Aggregate Stability to Drying and Wetting. 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_16
- DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, (2015). Dirección de metodología y producción estadística – DIMPE.

- Encuesta Nacional Agropecuaria ENA 2015. En: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2015/presentacion_ena_2015.pdf
- De Benedetto D., Montemurro F. & Diacono M. (2017). Impacts of Agro-Ecological Practices on Soil Losses and Cash Crop Yield. *Agriculture*, 7(12):103. <https://doi.org/10.3390/agriculture7120103>
- Díaz AM., González C., Palacios-Vargas, J. & Luciáñez SM. (2004). Clave dicotómica para la determinación de los colémbolos de Cuba (Hexapoda: Collembola). *Boln. S.E.A.*, 73-83.
- Eddy WC. & Yang WH. (2022). Improvements in soil health and soil carbon sequestration by an agroforestry for food production system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 333, 107945. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107945>
- Estrella SM. & González V. (2014). *Desarrollo sustentable: un nuevo mañana*. México D.F.: Grupo Editorial patria.
- Ezeaku PI. (2015). Evaluation of agro-ecological approach to soil quality assessment for sustainable land use and management systems. *Scientific Research and Essays* 10(15), 501-512. DOI: 10.5897/SRE10.404
- FAO (2008). *Manual diagnóstico participativo de comunicación rural, comenzando con la gente*. Segunda Edición. Dirección de Investigación y Extensión. Departamento de Ordenación de Recursos Naturales y Medio Ambiente Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 2008.
- FAO (2017). *Soil Organic Carbon: the hidden potential*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 90 pp. <https://www.fao.org/3/i6937e/i6937e.pdf>
- FAO (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. Roma. 198 pp.

- FAO (2019). TAPE Tool for Agroecology Performance Evaluation 2019 – Process of development and guidelines for application. Test version. Rome. 98 PP.
- Farrell JG. & Altieri, MA. (1999). “Sistemas agroforestales”. In: Altieri, M. ed (1999). Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. Nordan/Comunidad. Montevideo.
- Faucon MP., Houben, D. & Lambers, H. (2017). Plant Functional Traits: Soil and Ecosystem Services, Trends in Plant Science, 22(5): 385-394. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.01.005>.
- Furcal-Beriguete P., Robles-Argüello Z., Salazar-Díaz R. (2023). Evaluación de la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestal con Palma Africana (*Elaeis guineensis jacq.*). Tecnología en Marcha. 36(2): 20-31.
- Galán H. & Romero B. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía. Macla, 10: 48-60.
- Garibaldi LA., Gemmill-Herren B., D’Annolfo R., Graeub BE., Cunningham SA. & Breeze TD. (2017). Farming approaches for greater biodiversity, livelihoods, and food security. Trends Ecol. Evol. (Amst.) 32, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.001>.
- Gilkes RI. & Mckenzie, RM. (1988). Geochemistry and Mineralogy of Manganese in Soils. Chapter 2. Graham RD. et al. (eds.) , 23-35. Kluwer Academic Publishers.
- Gobernación de Norte de Santander (2016). Plan de Desarrollo para Norte de Santander 2016-2019. “Un Norte Productivo Para Todos”, San José de Cúcuta, Norte de Santander. 177 pp.
- Gregorich EG., Carter MR., Angers DA., Monreall CM. & Ellert BH. (1994). Towards a minimum data set to asses soil organic matter quality in agricultural soils. Canadian Journal of Soil Science. 74: 367-385.

- Gupta R.K. et al. (2008) Soil Water and Its Management. 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_560
- Hazleton PA. & Murphy BW. (2007). Interpreting Soil Test Results: What Do All The Numbers Mean?. CSIRO Publishing: Melbourne.
- Hernández CA. & Faye K. (2010). Papel de la gestión del conocimiento en el aprovechamiento de los recursos naturales, la generación de tecnologías que agregan valor a productos agropecuarios y la restauración del equilibrio ecológico en las cooperativas campesinas. DELOS, 3(7): 8 p.
- Hernández Núñez HE., Andrade HJ., Suárez Salazar JC., Sánchez A., JR., Gutiérrez SDR., Gutiérrez García, GA., Trujillo Trujillo E. & Casanoves, F. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. Revista de Biología Tropical, 69(1), 352-368. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42959>
- Hernández RM., Morros ME., Bravo CA., Pérez ZL., Herrera PE., Ojeda A., Morales JB., Fernández BO. (2011). La integración del conocimiento local y científico en el manejo sostenible de suelos en agroecosistemas de sabanas. Interciencia, 36 (2):104-112.
- Herrera CR., Calderón RL. & Gutiérrez MA. (2017). Soil quality index in conventional and semi-ecological farms producing plantain (Musa AAB Simmonds cv. Dominic Harton) in Anolaima-Cundinamarca, Colombia. Acta Agron. 66(4): 457-465.
- Hofman G. & Van Cleemput O. (2004). Soil and Plant Nitrogen. International Fertilizer Industry Association Paris. 31 pp.
- Hughes NP. & Williams RJP. (1988). An Introduction to Manganese Biological Chemistry. In: Graham, R.D., Hannam, R.J., Uren, N.C. (eds) Manganese in Soils and Plants. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 33. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2817-6_2

- IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2007). Metodología de Clasificación de tierras por su capacidad de uso. Bogotá: Imprenta Nacional.
- IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2012). Estudio general de suelos y zonificación física de tierras del departamento de Norte de Santander. Bogotá: Imprenta Nacional.
- Ismail-Meyer K., Stolt, MH. & Lindbo DL. (2018). Chapter 17 - Soil Organic Matter. Editor(s): Georges Stoops, Vera Marcelino, Florias Mees, Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths (Second Edition), Elsevier, Pages 471-512, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00017-6>
- Jezeer RE., Santos MJ., Boot RGA., Junginger M. & Verweij PA. (2018). Effects of shade and input management on economic performance of small-scale Peruvian coffee systems. *Agric. Syst.* 162, 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.014>.
- Kabala L. & Labaz B. (2018). Relationships between soil pH and base saturation-conclusions for Polish and international soil classifications. *SOIL SCIENCE ANNUAL* 69: 4/2018: 206-214. DOI: 10.2478/ssa-2018-0021.
- Karlen DL., Mausbach MJ., Doran JW., Cline RG., Harris RF. & Schuman GE. (1997). Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61:4-10.
- Krantz GW. & Walter DE. (Eds.), 2009. *A Manual of Acarology*. 3rd Edition. Texas Tech University Press. pp. 807.
- Kumar D., Ramani VP., Patel KC. & Shukla AK. (2021). Establishing Critical Limits for Nickel in Soil and Plant for Predicting the Response of Spinach (*Spinacia oleracea*). *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 69(1): 105-110. DOI: 10.5958/0974-0228.2021.00026.8
- López PJ. (2010). Manual de sistemas agroforestales sustentables. Agroforestería, silvopastoril, agrosilvopastoril y otros. Proyecto

- JIRCAS 2007 / 2010 “Estudio de Validación de Medidas contra el Calentamiento Global” Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) Serie “Guías y Manuales” en el Paraguay basado en la Forestación y Reforestación. Centro Internacional de Investigación de las Ciencias Agropecuarias del Japón. 68 pp.
- López R. & Delgado F. (1996). Suelos con limitaciones físicas. Evaluación, diagnóstico y manejo. Impacto en la actividad productiva de los sistemas agrícolas de Venezuela. Memorias del curso-taller realizado 19 al 23 de junio de 1995., (pág. 130). Mérida, Venezuela.
- Macdonald, C. A., Delgado-Baquerizo, M., Reay, D. S., Hicks, L. C., & Singh, B. K. (2018). Soil Nutrients and Soil Carbon Storage: Modulators and Mechanisms. *Soil Carbon Storage: Modulators, Mechanisms and Modeling*, 167–205. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812766-7.00006-8>
- Magdoff F., & van Es H. (2021). *Building soils for better crops: ecological management for healthy soils*. Fourth edition. | College Park: Sustainable Agriculture Research & Education, 2021. | Series: Handbook series; bk. 10.
- Manahan SE. (2000). *Environmental Chemistry* (Seventh ed.). Lewis Publisher. Boca Raton CRC Press LLC.
- Mancini Teixeira, H., Bianchi, J.J.A.F., Cardoso, I.M., Tiftonell, P. & Peña-Claros, M. (2021). Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic forest of Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 305, 107171. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107171>.
- Marks JA., Perakis SS., King EK. & Pett-Ridge J. (2015). Soil organic matter regulates molybdenum storage and mobility in forests. *Biogeochemistry* 125(2):1-17. DOI: 10.1007/s10533-015-0121-4
- McBride, MB. (1994). *Environmental Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press, 406 pp.

- McCarty LB., Ray LHJr., Quisenberry V. (2016). Soil Physical and Moisture Properties. Pages 1-72. En: McCarty LB., Ray LHJr., Quisenberry V. (2016). *Applied Soil Physical Properties, Drainage, and Irrigation Strategies*, Springer International Publishing Switzerland DOI 10.1007/978-3-319-24226-2
- Mccune, N., Rosset, P.M., Salazar, T.C., Moreno, A.S. & Morales, H. (2017). Mediated territoriality: rural workers and the efforts to scale out agroecology in Nicaragua. *J. Peasant Stud.* 44, 354–376. <https://doi.org/10.1080/03066150.2016.1233868>.
- McKenzie NJ, Jacquier DJ, Isbell RF, Brown KL (2004) *Australian Soils and Landscapes: An Illustrated Compendium*. CSIRO Publishing: Collingwood, Victoria.
- Melo O., Fernández-Méndez F. & Villanueva B. (2017). Hábitat lumínico, estructura, diversidad y dinámica de los bosques secos tropicales del Alto Magdalena. *Colombia Forestal*, 20(1): 19-30.
- Mengel K., Kirkby EA., Kosegarten H., Appel, T. (2001). Soil Copper. In: Mengel, K., Kirkby, E.A., Kosegarten, H., Appel, T. (eds) *Principles of Plant Nutrition*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2_16
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2011). Decreto 780 de 2011. DIARIO OFICIAL. AÑO CXLV. N. 48014. 17, MARZO, 2011. PAG.7.
- Monroe PHM., Gama-Rodrigues EF., Gama-Rodrigues, AC., Marques JRB. (2016). Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 221: 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.022>
- Montagnini F., Somarriba E., Murgueitio E., Fassola H. & Eibl B. (2015). *Sistemas Agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. Serie técnica. Informe técnico 402*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Editorial CIPAV, Cali, Colombia. 454p.
- Morales-Salazar M., Vilchez-Alvarado B., Chazdon RL., Ortega-Gutiérrez M., Ortiz-Malavassi E. & Guevara-Bonilla M. (2007).

Diversidad y estructura horizontal en los bosques tropicales del Corredor Biológico de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 9 (23): 19-28.

Moreno CE. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. M&T-Manuales y Tesis SEA. Vol. 1. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe, UNESCO. Ed. GORFI. Zaragoza, 86 p.

Moreno-Calles AI., Toledo MV. & Casas A. (2013). Los sistemas agroforestales tradicionales de México: una aproximación biocultural. *Botanical Sciences* 91 (4): 375-398, 2013.

Mound L. & Geoffrey K. (1998). *Thisanoptera an identification guide*. CAB International, Wallingford, The Netherlands. Mound, L. and P. Gillespie. 1997. *Identification guide to thrips associated with crops in Australia*. NSW Agriculture, Orange & CSIRO Entomology, Canberra, Australia.

Muindi EM. (2019). Understanding Soil Phosphorus. *International Journal of Plant & Soil Science* 31(2): 1-18.

Muñoz, M. (2017). Análisis de la afectación agrícola por sobrepoblación de hormiga arriera en la vereda de San Roque, municipio de Ubalá, Cundinamarca. *Especialización En Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales*. Facultad De Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada.

Nicholls CI. & Altieri MA. (2018). Caminos para la amplificación de la agroecología. *Boletín Científico* 1. CELIA Ediciones. Medellín, Colombia. 35 pp.

Nicholls, C.I. & Altieri, M.A. (2017). Agroecological principles for the conversion of farming systems: principles, applications, and making the transition. *J. Ecosyst. Ecography* S5, 1–8. <https://doi.org/10.1142/9781786343062>.

Noguera-Talavera A., Salmerón F. & Reyes-Sánchez N. (2019). Bases teórico-metodológicas para el diseño de sistemas agroecológicos.

Rev. FCA. UNCUYO, 51(1): 273-293.

- Obade V. & Lal R. (2016). A standardized soil quality index for diverse field conditions. *Science of the Total Environment*, 541: 424-434.
- Olibone D, Rosolem CA. (2010). Phosphate fertilization and phosphorus forms in an Oxisol under no-till. *Scientia Agricola*, 67:465-471.
- Olivares BO., Araya-Alman M., Acevedo-Opazo C., Rey JC., Cañete-Salinas P., Giannini KF., Balzarini M., Lobo D., Navas-Cortés J., Landa B., & Gómez JA. (2020). Relationship between soil properties and banana productivity in the two main cultivation areas in Venezuela. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00317-8>.
- Ortiz O. (2001). La información y el conocimiento como insumos principales para la adopción del manejo integrado de plagas. *Revista MIP*; 61: 12-22.
- Owens PR & Rutledge EM. (2005). Morphology. Editor(s): Daniel Hillel, *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier, Pages 511-520. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00002-3>
- Palomo-Campesino, S., González, J.A. & García- Llorente, M. (2018). Exploring the connections between agroecological practices and ecosystem services: a systematic literature review. *Sustain* 10. <https://doi.org/10.3390/su10124339>.
- Pan R., da Silva MA., Santos BT and Pereira SE., (2018). Processes of Soil Infiltration and Water Retention and Strategies to Increase Their Capacity. *Journal of Experimental Agriculture International*, 20(2): 1-14.
- Phogat VK., Tomar VS. & Dahiya R. (2015). Soil Physical Properties. Chapter 6. *Soil Science: An Introduction*.
- Porta J., López-Acevedo M. & Roquero C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Tercera edición. España: Ediciones Mundi Prensa.

- Pound B. (2003). *Agroforestería para la producción animal*. Mexico: Nacional. Staff, S. S. (2014). *Keys to soil taxonomy*. Washintong: USDA.
- Quiroz Medina, CR., Castellón JD., Cea Navas, NE., Ortiz MS. & Zuniga-Gonzalez CA. (2021). Caracterización de la macrofauna edáfica en diferentes sistemas agroforestales, en el Municipio de San Ramón, Departamento de Matagalpa, Nicaragua. *Nexo Revista Científica*, 34(02), 572–582. <https://doi.org/10.5377/nexo.-v34i02.11542>
- Rahn E., Liebig T., Ghazoul J., van Asten P., L aderach P., Vaast P., Sarmiento A., Garcia C. & Jassogne L., (2018). Opportunities for sustainable intensification of coffee agro-ecosystems along an altitudinal gradient on Mt. Elgon, Uganda. *Agric. Ecosyst. Environ.* 263, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.04.019>.
- Rai A., Singh, AK., Mishra R., Shahi B., Rai VK., Kumari N., Kumar V., Gangwar A., Sharma RB, Rajput J., Kumari N., Kumar S., Anal AKD, Rai S., Sharma S., Bahuguna A., Kumar M., Kumar A. & Singh S. (2020). Sulphur in Soils and Plants: An Overview. *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry*, 21(10): 66-70.
- Rayment GE, Higginson FR (1992) Electrical Conductivity. In ‘Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods’ Inkata Press: Melbourne.
- Reeve JR., Hoagland, LA., Villalba JJ., Carr PM., Atucha A., Cambar-della C., ... Delate K. (2016). Organic Farming, Soil Health, and Food Quality: Considering Possible Links. *Advances in Agronomy*, 319–367. doi: 10.1016/bs.agron.2015.12.003
- Richardson AE. (1994). Soil microorganisms and phosphorus availability. *Soil Biota*, 8: 50-62.
- Rodríguez Suárez L., Suárez SJC., Casanoves F., Ngo BMA. (2021) (2021). Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>.

- Rodríguez-Eugenio N., McLaughlin M. & Pennock D. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma, FAO. 144 pp.
- Ronque MUV., Fourcassié V. & Oliveira PS. (2018). Ecology and field biology of two dominant *Camponotus* ants (Hymenoptera: Formicidae) in the Brazilian savannah. *Journal of Natural History* 52: 237-252.
- Rousseau GX., Deheuvels O., Rodriguez AI. & Somarriba E. (2012). Indicating soil quality in cacao-based agroforestry systems and old-growth forests: The potential of soil macrofauna assemblage. *Ecological Indicators* 23: 535–543.
- Sahoo UK., Singh SL., Gogoi A., Kenye A. & Sahoo SS. (2019) Active and passive soil organic carbon pools as affected by different land use types in Mizoram, Northeast India. *PLoS ONE* 14(7): e0219969. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219969>
- Sánchez J., Argumedo A., Álvarez JF., Méndez JA. & Ortiz B. (2015). Conocimiento tradicional en prácticas agrícolas en el sistema del cultivo de amaranto en Tochimilco, Puebla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12 (2): 237-254.
- Sardi A., Torres AM. & Corredor G. (2018). Diversidad florística en un paisaje rural del piedemonte de los Farallones de Cali, Colombia. *Colombia Forestal*, 21(2): 142-160. <https://doi.org/10.14483/2256201X.10866>.
- Schiefer J., Lair GJ. & Blum WEH. (2015). Indicators for the definition of land quality as a basis for the sustainable intensification of agricultural production. *International Soil and Water Conservation Research* 3: 42-49.
- Seiter S. & Horwath WR. (2004). Strategies for managing soil organic matter to supply plant nutrients. In: Magdoff F., & Weil, RR. (Eds.). *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 269-293.
- Shen J., Yuan L., Zhang J., Li H., Bai Z., Chen X., Zhang W., Zhang F. (2011). Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physio.* 156(3): 997-1005.

- Siddique MNA., Sultana J. & Abdullah MR (2017). Aggregate Stability: An Indicator of Quality and Resistivity of Arable Soil. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 1(2): 1-7.
- Silva S. & Correa, R. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12(23): 13-34.
- Singer MJ. & Ewing S. (2000). Soil quality. In: *Handbook of soil science*. (Ed. M.E. Sumner). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. p. 271
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Srivastava SC. & Singh JS. (1988). Carbon and phosphorus in the soil biomass of some tropical soils of India. *Soil Biology and Biochemistry* 20: 743-747.
- Stevenson FJ. & Cole MA. (1999). *Cycles of Soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. Second edition. 427 pp.
- Tapia-Coral SC., Pinto HC., Candre IA., Asencio C., Cuellar CR. & Waldez F. (2019). Caracterización de la macrofauna del suelo en fragmentos forestales en el municipio de Leticia, Amazonía colombiana. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 11(1): DOI: <https://doi.org/10.24188/recia.v11.n1.2019.690>
- Torres CMME., Jacovine LAG., Nolasco de Olivera Neto S. et al. (2017). Greenhouse gas emissions and carbon sequestration by agroforestry systems in southeastern Brazil. *Sci Rep.* 7, 16738. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16821-4>
- Triplehorn CA. & Johnson, NF. (2005). *Borror and DeLong's Introduction to the Study of Insects*. Belmont, California, Brooks/Cole, ThomsonLearning. 864 pp.
- United States Department of Agriculture, USDA (2014). *Soil Health – Infiltration. Soil Health Guides for Educators*. 7 pp.
- UPRA Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, (2017). *Departamento de Norte de Santander. Rendición de Cuentas*. Marzo de

2017. En: <https://drive.google.com/file/d/0B41eMRb76ohEOEw2aU1QMXViSUU/view>

- Usher MB., Sier ARJ., Hornung M. & Millard P. (2006). Understanding biological diversity in soil: The UK's Soil Biodiversity Research Programme. *Applied Soil Ecology* 33, 101-113.
- Vázquez ML., Matienzo BY., Alfonso SJ., Veitía RM., Paredes RE. & Fernández GE. (2012). Contribución al diseño agroecológico de sistemas de producción urbanos y suburbanos para favorecer procesos ecológicos. *Agricultura Orgánica*, 18(3): 14-18.
- Villota, H. (2005). Geomorfología aplicada a los levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC (Departamento Nacional de Estadística). 184 pp.
- Vitousek PM. & Matson PA. (1985). Disturbance, nitrogen availability and nitrogen losses in an intensively managed loblolly pine plantation. *Ecology* 66: 1360-1376.
- Vitousek PM. & Melillo JM. (1979). Nitrate losses for disturbed ecosystems: patterns and mechanisms. *Forest Sci.* 25: 605-619.
- White PJ. & Broadley MR. (2003). Calcium in Plants. *Annals of Botany* 92: 487-511. doi:10.1093/aob/mcg164.
- Yan B. & Hou Y. (2018). Effect of Soil Magnesium on Plants: A Review. 2nd International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 170 (2018) 022168 doi :10.1088/1755-1315/170/2/022168
- Yeates, G. (2003). Nematodes as soil indicator: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils*, 37:199-210.
- Yimer F., Ledin S. & Abdelkadir A. (2008). Concentrations of exchangeable bases and cation exchange capacity in soils of cropland, grazing and forest in the Bale Mountains, Ethiopia. *Forest Ecology and Management* 256: 1298-1302.

- Zarco-Espinoza VM., Valdez-Hernández JI., Ángeles-Pérez G. & Castillo -Acosta O. (2010). “Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del Parque Estatal de Agua Blanca, Macuspana, Tabasco”. *Universidad y Ciencia*, 21(1): 1-17.
- Zhou Y., Fan Y., Lu G., Zhang A., Zhao T., Sun G., Sun D., Yu Q. & Ren X. (2022). Assessment of soil quality for guided fertilization in 7 barley agro-ecological areas of China. *PLoS ONE* 17(1): e0261638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261638>
- Zinck A. (1987). *Physiography and soils*. Bogotá: IGAC.
- McLean EO. (1982). *Methods of soil analysis: part II- Chemical and Microbiological Properties*. En Page AL, Miller RH, Keeney DR (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monographs N° 9*. American Society of Agronomy. Madison, WI, EEUU. pp. 159-165.
- Gee GW. & Bauder JW. (1986). *Particle- size Analysis (Vol. 9)*. (A. (Klute, Ed.).
- Bray RH. & Kurtz LT. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science Society of America*, 28(1), 243-246. https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1945/01000/Determination_of_Total,_Organic,_and_Available.6.aspx
- Keeney DR. & Nelson DW. (1982). *Nitrogen-Inorganic Forms*. En Page AL, Miller RH, Keeney DR (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monographs N° 9*. American Society of Agronomy. Madison, WI, EEUU. pp. 159-165.
- Hunter A. (1974). *Methods commonly used for routine soil analysis in cooperating countries*. North Carolina State University. *International Soil Fertility Evaluation and Improvement*, 12.
- Thomas G. (1982) *Exchangeable Cations*. En Page AL, Miller RH, Keeney DR (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monographs N° 9*. American Society of Agronomy. Madison, WI, EEUU. pp. 159-165.

Tamayo J., Martínez E., Monforte G., Munguia A. & Ruiz A. (2014). La agroecología como propuesta de modelo de producción aplicado al cultivo de Chile Habanero en Peto, Yucatán. *Revista Mexicana de Agronegocios*. 35: 969-978. Disponible en <http://www.re-dalyc.org/pdf/141/14131676006.pdf>



Ana Francisca
González Pedraza

Nacida en San Carlos de Zulia, estado Zulia, Venezuela, esta profesional de ascendencia colombiana se graduó como Ingeniera Agrónoma en la Universidad del Zulia. Posteriormente, completó su maestría en Manejo de los Recursos Agua y Suelo en la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales (UNELLEZ) en Guanare, estado Portuguesa. Su formación académica culminó con un Doctorado en Ciencias, con especialización en Ecología, obtenido en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC) en el año 2011, situado en el estado Miranda, Venezuela.

Actualmente dirige el Semillero de Investigación en Sistemas Agropecuarios Sostenibles (SISPAS) y ocupa el cargo de subdirectora del Grupo de Investigación en Agroecología y Transformación Agraria Sostenible (GIATAS) y es docente de las asignaturas Conservación de Suelos y Agroecología del programa Ingeniería Agronómica, vinculados a la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Pamplona.

Ha destacado con numerosas publicaciones en revistas indexadas a nivel nacional e internacional, así como la redacción de capítulos para diversos libros. Sus áreas de especialización abarcan el manejo y conservación de suelos, así como la agroecología.



Leónides Castellanos
González

Graduado de Ingeniero Agrónomo en la Universidad Central de Las Villas 1978. Master y Dr. en Ciencias Agrícolas 2002. Profesor/investigador Titular. Universidad de Cienfuegos. Posdoctorado en Metodología de la Investigación Científica, Cuba. Posdoctorado en Nutrición Mineral en Plantas, UNESP, Brasil. Director de Programas de Maestrías en Agroecología y Agricultura Sostenible. Profesor de la Universidad de Pamplona Colombia desde 2016. Investigador Senior de Colciencias desde 2017. Director de Programa de Maestría en Ciencias Agrarias. Autor de 16 libros y más de 180 artículos científicos. Experticia: Fitopatología, Control biológico, Sanidad Vegetal, MIP, Agroecología y Agricultura Sostenible.



Alfonso Eugenio
Capacho Mogollón

Nació en Pamplona, el 22 de Enero de 1959; estudió su primaria en el Liceo Niño Jesús de Praga, terminó bachillerato en el Seminario Menor de Pamplona, posteriormente realizó estudios universitarios en el Instituto Superior de Educación Rural obteniendo los títulos de Especialista en Ciencias Agropecuarias y Tecnólogo Agropecuario, en la Universidad Francisco de Paula Santander de Ocaña estudió Zootecnia, en la Universidad de Pamplona adelantó estudios de posgrado obteniendo el título de Magíster en Gestión de la Calidad de la Educación Superior. Docente de planta de la Universidad de Pamplona adscrito a la Facultad de Ciencias Agrarias, categoría Asociado; Miembro del Grupo de Investigación GIAS. Ha participado en proyectos de Extensión e Investigación entre ellos proyecto Plantar, el cual se desempeñó como Gerente.