

William Ballesteros • Olegario Preciado • José Aguiño

Tipificación de sistemas de producción tradicionales de cacao en Tumaco, Nariño:

**Un enfoque para la sostenibilidad y competitividad
del sector cacaotero**



Editorial
Universidad de Nariño

èditorial

Universidad de **Nariño**

**Tipificación de sistemas de
producción tradicionales
de cacao en Tumaco, Nariño:**
Un enfoque para la sostenibilidad y competitividad
del sector cacaotero

**Tipificación de sistemas de
producción tradicionales
de cacao en Tumaco, Nariño:**
Un enfoque para la sostenibilidad y competitividad
del sector cacaotero

William Ballesteros Possú
Olegario Preciado Saya
José Evelio Aguiño Borja

èditorial
Universidad de **Nariño**

Ballesteros Possú, William

Tipificación de sistemas de producción tradicionales de cacao en Tumaco, Nariño : un enfoque para la sostenibilidad y competitividad del sector cacaotero / William Ballesteros Possú, Olegario Preciado Saya, José Evelio Aguiño Borja—1ª. Ed.-- San Juan de Pasto : Editorial Universidad de Nariño, 2026.

175 páginas : ilustraciones, Graficas, tablas

Incluye Referencias bibliográficas p. 155 - 166

ISBN: 978-628-7864-69-6 Impreso

ISBN: 978-628-7864-70-2 Digital

1. Cultivo de cacao 2. Cacao—Producción tradicional—Tumaco, Nariño (Colombia) 3. Cacao—Tipificación de sistemas productivos—Tumaco, Nariño (Colombia) 4. Evaluación económica 5. Tipos de fincas cacaoteras 6. Sistemas agroforestales—Cacao I. Preciado Saya, Olegario II. Aguiño Borja, José Evelio

633.7486158 B191t – SCDD-Ed. 22



SECCIÓN DE BIBLIOTECA

Tipificación de sistemas de producción tradicionales de cacao en Tumaco, Nariño: un enfoque para la sostenibilidad y competitividad del sector cacaotero.

© Editorial Universidad de Nariño

© William Ballesteros Possú

Olegario Preciado Saya

José Evelio Aguiño Borja

ISBN Impreso: 978-628-7864-69-6

ISBN Digital: 978-628-7864-70-2

DOI: <https://doi.org/10.22267/lib.udn.062>

Primera edición

Corrección de estilo: Ricardo Erazo Mera

Diseño y diagramación: Angie Gabriela Ordoñez Chaves

Fecha de publicación: Marzo 2026

San Juan de Pasto - Nariño - Colombia

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o cualquier propósito, sin la autorización escrita de sus Autores o de la Editorial Universidad de Nariño

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| PRÓLOGO | 10 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. MARCO CONCEPTUAL | 12 |
| 2.1 Tipificación y Caracterización de Sistemas Productivos Agropecuarios..... | 15 |
| 2.2 Sistemas de Producción Agrícola | 18 |
| 2.3 Sistemas de Producción Tradicional | 20 |
| 2.4 Sistemas Agroforestales y Cacaocultura | 20 |
| 2.5 Contexto de la Cacaocultura: Mundial, Regional y Local | 21 |
| 2.5.1 Contexto Mundial | 21 |
| 2.5.2 Contexto Regional: Latinoamérica | 22 |
| 2.5.3 Contexto Local: Colombia, Nariño y Tumaco | 24 |
| 2.6 Tipificación de Sistemas Productivos con Cacao en el Mundo | 26 |
| 2.7 Tipificación de Sistemas Productivos con Cacao en Colombia | 28 |
| 2.8 Tipificación de Sistemas Productivos con Cacao en Tumaco, Nariño | 30 |
| 2.9 Agroforestería | 33 |
| 2.9.1 Sistemas Agroforestales | 35 |
| 2.10 Evaluación Económica de los Sistemas Agroforestales | 36 |
| 2.11 Métodos de Valoración de Variables de Caracterización | 39 |
| 2.12 Análisis Multivariado | 41 |
| 2.12.1 Análisis de Correspondencias | 42 |
| 2.12.2 Análisis Clúster | 44 |
| 2.12.2.1 Métodos de Validación de Clústeres | 45 |
| 2.13 Estudios de Caso | 48 |
| 3. METODOLOGÍA | 54 |
| 3.1 Localización y Descripción del Área de Estudio | 54 |
| 3.2 Descripción de las Zonas de Estudio | 55 |
| 3.3 Flujograma Metodológico de la Investigación | 56 |
| 3.4 Población | 57 |
| 3.5 Variables evaluadas | 58 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.6 | Diseño del muestreo | 58 |
| 3.7 | Tamaño de la muestra | 59 |
| 3.8 | Procesamiento y Análisis de Datos | 61 |
| 3.8.1 | Variables con Bajo Valor Discriminante | 61 |
| 3.8.2 | Análisis de Correspondencias Múltiples | 62 |
| 3.8.3 | Análisis Clúster | 62 |
| 3.8.4 | Tipificación de las Fincas | 64 |
| 3.8.5 | Diseño Participativo de Alternativas | 65 |
| 4. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 67 |
| 4.1 | Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM) | 67 |
| 4.2 | Análisis Jerárquico de los Componentes | 71 |
| 4.3 | Descripción de las Agrupaciones de los Agricultores y sus Tipologías | 73 |
| 4.3.1 | Clúster 1 | 74 |
| 4.3.2 | Clúster 2 | 75 |
| 4.3.3 | Clúster 3 | 76 |
| 4.4 | Análisis de las Variables con Mayor Contribución a los Componentes | 77 |
| 4.4.1 | Producción de Cacao Seco (PCS) | 77 |
| 4.4.2 | Distancia a la Finca (DIST) | 79 |
| 4.4.3 | Especies de Sombrío (ESPS) | 81 |
| 4.4.4 | Mano de Obra (MNO) | 83 |
| 4.4.5 | Registro de Actividades y Costos de Producción (RAC) | 85 |
| 4.4.6 | Venta del Grano de Cacao Seco (VGCS) | 87 |
| 4.4.7 | Topografía de la Finca (TFI) | 89 |
| 4.4.8 | Uso de las Especies (USE) | 90 |
| 4.5 | Tipificación de los Sistemas de Producción Tradicionales de Cacao | 92 |
| 4.5.1 | Fincas con Rendimientos Superiores a 1000 kg/ha-1 (Tipo 1) | 93 |
| 4.5.2 | Fincas con Rendimientos entre 600 y 1000 kg/ha-1 (Tipo 2) | 95 |
| 4.5.3 | Fincas con Rendimientos Menores a 600 kg/ha (Tipo 3) | 97 |

| | |
|--|------------|
| 4.6 Distribución de Nutrientes en las Fincas Tipo | 102 |
| 4.7 Interpretación Cuadro Indicativo de Nutrientes en Suelo para Cacao | 105 |
| 4.8 Descripción de los Minerales Encontrados en los Tipos de Fincas | 114 |
| 4.8.1 pH del Suelo en Fincas de Cacao | 114 |
| 4.8.2 Materia Orgánica (MO) | 116 |
| 4.8.3 Fósforo (P): Limitaciones y oportunidades en el Pacífico Nariñense | 117 |
| 4.8.4 Azufre (S) | 120 |
| 4.8.5 Boro (B) | 122 |
| 4.8.6 Calcio (Ca) | 124 |
| 4.8.7 Magnesio (Mg) | 126 |
| 4.8.8 Potasio (K) en Sistemas Tradicionales de Producción de Cacao | 129 |
| 4.8.9 Hierro (Fe) en Suelos Cacaoteros: Toxicidad Potencial y Efectos Fisiológicos | 131 |
| 4.8.10 Cobre (Cu): Rol Fisiológico, Diagnóstico y Estrategias de Manejo | 134 |
| 4.8.11 Manganeso (Mn): Presencia Elevada y Manifestaciones Fisiológicas en Cacao | 136 |
| 4.8.12 Zinc (Zn): Desafíos de Deficiencia y Toxicidad en Suelos Cacaotero | 139 |
| 5. ESTRATEGIAS DE MANEJO PARTICIPATIVO PARA CADA TIPOLOGÍA DE FINCA DE CACAO IDENTIFICADA | 142 |
| 5.1 Alternativas de Manejo | 142 |
| 5.1.1 Estrategia de Manejo de las Fincas Tipo I | 142 |
| 5.1.2 Estrategia de Manejo de las Fincas Tipo II | 144 |
| 5.1.3 Estrategia de Manejo de las Fincas Tipo III | 146 |
| 6. CONCLUSIONES | 148 |
| 7. RECOMENDACIONES | 151 |
| 7.1 Intervención Diferenciada por Tipología de Finca cacaotera | 151 |
| 7.2 Fortalecimiento de Capacidades mediante Asesoría Técnica | 151 |

| | |
|---|------------|
| 7.3 Rehabilitación y Renovación de Plantaciones de Cacao | 152 |
| 7.4 Investigación sobre Toxicidad por Hierro en Fincas Cacaotera .. | 153 |
| 7.5 Determinación del Punto de Equilibrio Específico | 153 |
| 7.6 Uso de Biopreparados y Abonos Orgánicos | 154 |
| 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 155 |
| 9. ANEXOS | 167 |



PRÓLOGO

El cacao (*Theobroma cacao* L.), conocido desde tiempos ancestrales como el “alimento de los dioses”, trasciende su valor como cultivo agrícola para convertirse en un símbolo de tradición, resiliencia y esperanza para las comunidades rurales del Pacífico colombiano. En Tumaco, Nariño, este cultivo no solo sostiene la economía de miles de pequeños productores, sino que también encarna una práctica cultural que ha perdurado a través de generaciones, al integrar agricultura, biodiversidad y vida comunitaria. Sin embargo, su relevancia hoy va mucho más allá de lo local: el cacao se ha posicionado como un recurso estratégico en un mundo donde su demanda y precios alcanzan niveles históricos, lo cual ofrece oportunidades únicas para regiones históricamente marginadas como esta.

Desde hace varios años, debido a los problemas de los cultivos en África, el cacao vive un momento de auge global sin precedentes. Los precios internacionales han superado los 10.000 dólares por tonelada en los últimos meses, impulsados por una combinación de factores: reducción de la oferta en África Occidental debido a condiciones climáticas adversas, aumento de la demanda de chocolate premium y cacao fino de aroma, y una mayor conciencia sobre la sostenibilidad en las cadenas de suministro (International Cocoa Organization, 2024). Para Colombia, este escenario representa una oportunidad económica crucial. Como el décimo productor mundial y líder en cacao fino de aroma, el país ha visto cómo su producción se consolida como un motor de desarrollo rural, con 72.500 toneladas cosechadas en 2024 y un crecimiento sostenido del 5 % anual (Federación Nacional de Cacaoteros, 2025). En ese contexto, Tumaco emerge como un epicentro clave, al albergar el 93 % de las hectáreas cacaoteras de Nariño, y destacarse por su calidad única, reconocida en mercados internacionales.

Más allá de su valor económico, el cacao tiene un potencial transformador que lo convierte en un instrumento de paz. En regiones como Tumaco, marcadas por décadas de conflicto armado, pobreza y abandono estatal, este cultivo ofrece una alternativa viable a la economía ilícita. Su cultivo,

basado en sistemas agroforestales tradicionales, genera ingresos lícitos y fomenta la cohesión comunitaria y la conservación ambiental, dos pilares esenciales para la pacificación. Programas impulsados tras los Acuerdos de Paz de 2016 han demostrado que el cacao puede ser un vehículo para la reconciliación, al brindar oportunidades a excombatientes, víctimas y campesinos desplazados (Agencia para la Reincorporación y la Normalización, 2023). En un país que aún lucha por sanar sus heridas, el cacao se alza como un símbolo de esperanza y un medio para construir un futuro más equitativo.

Este libro surge de un esfuerzo colectivo por documentar, analizar y fortalecer los sistemas de producción tradicionales de cacao en Tumaco. Los autores transformamos este estudio en una obra accesible y práctica, dirigida a productores, investigadores, extensionistas y tomadores de decisiones. A través de un enfoque científico y participativo presentamos una caracterización detallada de los sistemas cacaoteros de la región, identificamos sus fortalezas y desafíos, y proponemos estrategias para mejorar su sostenibilidad y competitividad.

En un momento en que los altos precios del cacao abren nuevas posibilidades, este libro busca ser un puente entre el conocimiento académico y las necesidades reales de los productores de Tumaco. Nuestro objetivo es claro: contribuir a que este cultivo prospere como una fuente de riqueza y consolide su rol como herramienta de desarrollo y paz en una de las zonas más deprimidas y resilientes de Colombia. Esperamos que estas páginas sirvan de inspiración y guía para quienes trabajan día a día en los cacaotales, y un llamado a la acción para quienes pueden apoyar su transformación.



1. INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo de importancia global, considerado como un *commodity*, cultivado en más de 50 países tropicales y base de una industria que mueve miles de millones de dólares anuales. En estos años, el mundo enfrenta un escenario de auge sin precedentes para este cultivo, con precios internacionales que superan los 10.000 USD por tonelada, debido a una oferta limitada en África Occidental que aporta el 76 % de la producción mundial (International Cocoa Organization, 2024) y una creciente demanda de chocolate *premium* y cacao sostenible. Este contexto posiciona al cacao como un recurso estratégico no solo económico, sino también ambiental, al ser cultivado en sistemas agroforestales que mitigan el cambio climático y preservan la biodiversidad (Rice & Greenberg, 2000). Sin embargo, la heterogeneidad de los sistemas productivos en el orden global –desde monocultivos intensivos en Ghana hasta arreglos diversificados en Asia– plantea retos para optimizar su sostenibilidad y competitividad.

En América Latina, el cacao destaca por su calidad de fino de aroma, representando el 80 % de este segmento de mercado (International Cocoa Organization, 2023). Países como Ecuador, Perú y Brasil lideran la región con sistemas agroforestales que combinan cacao con especies maderables y frutales, alcanzando rendimientos de 300-600 kg/ha/año, aunque con limitaciones tecnológicas (Cabral et al., 2021). Esta región, que produce cerca del 18 % del cacao mundial, se beneficia del creciente interés por productos certificados y trazables, lo que eleva su valor en mercados internacionales. No obstante, la falta de inversión y las brechas en infraestructura siguen siendo obstáculos para su pleno y potencial aprovechamiento.

En Colombia, el cacao se ha consolidado como un cultivo clave para el desarrollo rural y la paz. Con una producción de 72.500 toneladas en 2024, un aumento del 5 % respecto a 2023, el país se posiciona como el décimo productor mundial y líder en cacao fino de aroma, que constituye el 95 % de su cosecha (Federación Nacional de Cacaoteros, 2025). Los sistemas productivos varían desde tradicionales de baja densidad hasta tecnificados

con rendimientos superiores a 1.000 kg/ha/año, aunque el promedio nacional de 550 kg/ha/año refleja un rezago frente al punto de equilibrio de 1.500 kg/ha/año propuesto por Fedecacao (Federación Nacional de Cacaoteros, 2018). Tras los Acuerdos de Paz de 2016, el cacao ha emergido como una alternativa a cultivos ilícitos, apoyado por programas de sustitución que benefician a más de 52.000 familias cacaoteras (Agencia para la Reincorporación y la Normalización, 2023). Pese a esos avances, persiste la baja adopción tecnológica y la volatilidad de precios.

En el ámbito regional, Nariño es un epicentro cacaotero en el Pacífico colombiano, con 22.000 hectáreas cultivadas, de las cuales Tumaco concentra el 93 % (Federación Nacional de Cacaoteros, 2024). La producción departamental alcanzó 3.600 toneladas en 2024, y se destacó por su calidad reconocida en mercados europeos y norteamericanos. A pesar de ello, los rendimientos promedio de 232-300 kg/ha/año reflejan limitaciones como suelos deficientes en nutrientes y falta de asistencia técnica (Universidad Nacional de Colombia, 2024). Los sistemas agroforestales predominantes, integrados con plátano, yuca y árboles maderables, ofrecen beneficios ecológicos, pero su baja productividad exige estrategias específicas para aprovechar el auge del mercado global.

En Tumaco, la cacaocultura es más que una actividad económica: es un pilar cultural y social para comunidades afrodescendientes que gestionan 18.600 hectáreas, de las cuales 14.000 están en producción. Con rendimientos promedio inferiores a 300 kg/ha/año, muy por debajo del promedio nacional y del punto de equilibrio de 1.500 kg/ha/año estimado por Fedecacao (2018), la región enfrenta retos históricos como el abandono estatal, el conflicto armado y la precariedad de infraestructura (Cordeagropaz, 2019). Aun así, el cacao de Tumaco tiene un potencial inmenso, impulsado por su calidad de fino aroma y el contexto actual de precios elevados, lo que lo convierte en una oportunidad para la pacificación y el desarrollo sostenible.

La investigación científica sobre los sistemas de producción indica la importancia del conocimiento de la diversidad como fundamento principal del entorno agrícola, los sistemas agroforestales tropicales, como los



sistemas de cacao, se caracterizan por asociaciones complejas de múltiples funciones y los árboles y los cultivos de diferentes edades, son una alternativa sostenible a los sistemas agrícolas intensivos modernos (Ngo et al., 2013).

La actividad cacaotera genera empleo e ingresos y preserva la biodiversidad a través de sistemas agroforestales. En un mundo donde la producción sostenible es clave, este libro busca aportar conocimiento práctico para transformar los sistemas tradicionales de Tumaco en modelos resilientes y rentables, que beneficien a los productores y al sector en su conjunto.

También tiene como objetivo tipificar los sistemas de producción tradicionales de cacao en Tumaco para diseñar estrategias de manejo que mejoren su productividad y competitividad. La investigación, realizada en 16 veredas de consejos comunitarios y zonas aledañas a la carretera, empleó un enfoque participativo con encuestas, análisis estadísticos y talleres con productores. Los resultados identifican tres tipologías de fincas, evalúan las condiciones de los suelos y proponen soluciones adaptadas a las realidades locales. En un mundo donde la sostenibilidad y la equidad son imperativos, este trabajo busca transformar los sistemas cacaoteros de Tumaco en modelos resilientes y rentables, que contribuyan al bienestar de sus productores y al fortalecimiento del sector nacional e internacional.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Tipificación y Caracterización de Sistemas Productivos Agropecuarios

La tipificación agrupa sistemas productivos según características comunes, facilitando la planificación y la asignación eficiente de recursos (Valerio et al., 2004). Según Escobar y Berdegué (1990), este proceso ordena la diversidad y mejora la comprensión de la agricultura campesina. La caracterización, por su parte, describe analíticamente las interacciones socioeconómicas y biofísicas de los sistemas, permitiendo identificar oportunidades de mejora (Ospina, 2004). En Tumaco, estas técnicas son esenciales para abordar la heterogeneidad de los sistemas cacaoteros y diseñar intervenciones específicas.

Los primeros trabajos empíricos realizados en el tema de la tipificación y caracterización de sistemas de producción agropecuarios, en América Latina, se reportan a finales de la década de 1980 cuando se crearon las redes de investigación de sistemas de producción (Martínez (2013); algunas de las más importantes son: la Red de Investigación en Sistemas de Producción de América Latina (Rispal) y la Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de Producción - Rimisp.

Así mismo, la caracterización de los sistemas agroforestales consiste en la descripción analítica e integral de sus características socioeconómicas y biotécnicas (composición, estructura, funcionamiento, productos, capacidad de conservar recursos naturales), que son de utilidad para realizar evaluaciones y facilitar la toma de decisiones, de acuerdo con necesidades particulares (Ospina, 2004); lo anterior debe abordarse como un proceso mediante el cual es posible mejorar sistemáticamente el nivel de comprensión de distintas tecnologías agroforestales en contextos regionales y de finca, además la caracterización permite describir y/o identificar oportunidades que ofrecen los sistemas al productor y al entorno, para realizar un manejo óptimo de las diferentes especies presentes en el sistema.



La caracterización y tipificación de los sistemas productivos han incorporado múltiples enfoques de análisis estadístico multivariado con el fin de identificar los factores clave que explican la diversidad observada entre las unidades agrícolas. Estos factores pueden ser de naturaleza física, biótica, socioeconómica o una combinación compleja de ellos, y su influencia varía según el nivel jerárquico en que se manifiestan dentro del sistema (Valerio et al., 2004). Mediante este proceso, es posible construir agrupaciones homogéneas de unidades de producción, al revelar patrones estructurales ocultos que permiten comprender mejor la lógica de funcionamiento de cada sistema agrícola y orientar intervenciones técnicas diferenciadas. Esta metodología facilita la planificación territorial y constituye una herramienta poderosa para el diseño de políticas públicas adaptadas a realidades productivas específicas.

La agricultura se configura como un sistema dinámico en el que convergen de manera compleja múltiples dimensiones biofísicas y socioeconómicas. Estas interacciones han impulsado el desarrollo de enfoques integradores que reconocen la necesidad de analizar el agroecosistema como una totalidad funcional, en lugar de una suma de partes aisladas (Castillo et al., 2012). Desde esta perspectiva, la comprensión del sistema productivo exige evaluar su estructura ecológica y también sus relaciones sociales, económicas y culturales, que condicionan profundamente su sostenibilidad y capacidad de adaptación en contextos diversos.

No obstante, autores como Sarandón (2014) y Borderías y Muguruza (2014) argumentan que, más allá de una visión fragmentada, los procesos agrícolas deben comprenderse como sistemas complejos integrados por componentes naturales, sociales y económicos que interactúan de manera sinérgica dentro de un espacio definido. Esta concepción sistémica implica que cada elemento –desde el suelo hasta la dinámica familiar del productor– contribuye al cumplimiento de una finalidad común, lo cual exige marcos analíticos que integren la funcionalidad ecológica con las lógicas culturales y productivas propias de cada territorio.

Este entramado de elementos y relaciones ha sido conceptualizado con el término *agroecosistema*, entendido como una unidad ecológica en el cual convergen factores bióticos y abióticos en permanente interacción. En ese contexto, el componente biótico no se limita únicamente a los cultivos o animales domésticos destinados a la producción, sino que abarca también organismos espontáneos como arvenses, insectos y comunidades microbianas presentes en el aire, el suelo y la biomasa circundante, los cuales cumplen funciones ecológicas fundamentales (Malagón, 2001; Castillo et al., 2012). Esa visión holística reconoce que el bienestar humano derivado de la agricultura depende de un delicado equilibrio funcional entre estos múltiples actores ecológicos.

La caracterización se constituye en una herramienta metodológica clave para identificar la distribución, estructura e interacciones de los sistemas productivos, al permitir no solo describir sus propiedades internas, sino también cuantificar las diferencias que existen entre unidades agrícolas. Este enfoque analítico facilita la comprensión funcional de cada sistema, al revelar las conexiones entre factores biofísicos y socioeconómicos, y proporciona insumos estratégicos para la planificación, la asignación eficiente de recursos y la mejora progresiva de las unidades de producción (Ríos et al., 2004).

De acuerdo con Valerio et al. (2004), los procesos de caracterización de sistemas productivos pueden organizarse en cinco etapas metodológicas fundamentales. La primera consiste en la descripción preliminar de la población objeto de estudio, a modo de aproximación exploratoria. La segunda define el diseño muestral y construye los instrumentos adecuados para la recolección de datos. La tercera implica el levantamiento de información en campo y la elaboración de una base de datos estructurada. La cuarta aplica una reducción de la dimensionalidad de las variables, mediante el empleo de técnicas estadísticas multivariadas que permiten identificar patrones relevantes. La quinta procede a la clasificación de las unidades de producción mediante métodos de agrupamiento, con el fin de delimitar subsistemas productivos homogéneos que sirvan como base para la planificación y la intervención técnica diferenciada.



2.2 Sistemas de Producción Agrícola

Los sistemas de producción agrícola pueden entenderse como estructuras organizadas compuestas por múltiples elementos interrelacionados, cuya interacción da lugar a procesos complejos de transformación ecológica, técnica y social. Siguiendo la teoría general de sistemas propuesta por Bertalanffy (1968), estos sistemas no constituyen simples agregados de componentes, sino configuraciones organizadas de materia y energía en un contexto temporo-espacial definido. Su estructura está determinada por la disposición interna de subsistemas como el suelo, los cultivos, el clima y la gestión humana mientras que su funcionalidad se expresa a través de los flujos de materia, energía e información que circulan entre dichos elementos.

En este marco, los sistemas agrícolas se conciben como entidades dinámicas, cuya capacidad de adaptación y evolución depende de las interacciones entre factores biofísicos, económicos y culturales. Así, comprenderlos requiere descomponer sus partes constitutivas y analizar las sinergias y retroalimentaciones que moldean su comportamiento en contextos territoriales específicos.

Según Peña et al. (2007), un sistema de producción agrícola debe entenderse como un proceso secuencial y estratégico que parte de la definición de prioridades en el área productiva. A partir de esas directrices, se procede al diseño del sistema mediante la selección de prácticas agronómicas y tecnológicas que sean congruentes con los objetivos trazados. Luego, se implementan los recursos tanto materiales como humanos de forma articulada, con el propósito de generar las capacidades productivas necesarias para alcanzar los resultados deseados. Este enfoque pone de relieve la naturaleza deliberada y adaptativa de los sistemas agrícolas, los cuales deben responder tanto a condiciones técnicas como a contextos sociales y económicos específicos.

Rodríguez et al. (1996) plantean que los sistemas de producción deben abordarse desde una perspectiva integral, considerando simultáneamente los factores físicos, bióticos, económicos, socioculturales y ambientales

que intervienen en su dinámica. Este enfoque integral facilita una comprensión profunda de su estructura y funcionamiento y permite el análisis crítico y la formulación de hipótesis de cómo estos factores interactúan para definir el manejo y la razón de ser de los sistemas productivos en contextos específicos. Igual proporciona elementos clave para la toma de decisiones estratégicas por parte de gestores y planificadores regionales, y orienta el desarrollo hacia trayectorias más sostenibles y adaptadas a las realidades locales.

Los sistemas productivos agrícolas constituyen estructuras organizadas de actividades, procesos y recursos mediante las cuales las comunidades humanas intervienen y modifican su entorno natural con el propósito de generar bienes agrícolas. En estos sistemas confluyen factores biofísicos, tales como el tipo de suelo, las características climáticas y las variedades de cultivos, junto con elementos socioeconómicos que incluyen la mano de obra disponible, las tecnologías implementadas y las dinámicas de mercado (FAO, 2023; Altieri & Nicholls, 2020). Esa diversidad de elementos permite la existencia de un amplio espectro de configuraciones, desde los sistemas tradicionales orientados principalmente a la subsistencia familiar hasta los modelos intensivos altamente tecnificados con objetivos comerciales a gran escala. En consecuencia, la estructura y funcionamiento de los sistemas productivos agrícolas están profundamente condicionados por el nivel tecnológico disponible, la escala de producción adoptada y las metas específicas de los productores involucrados.

De acuerdo con Valerio et al. (2022), los sistemas productivos se definen por una interacción dinámica y continua entre componentes clave como el manejo integrado del suelo, la elección estratégica de especies cultivadas y las diversas prácticas culturales aplicadas, todas ellas ajustadas a contextos locales específicos y condicionadas por tendencias globales. En particular, cuando se examina el cultivo del cacao, Somarriba et al. (2018) subrayan que estos sistemas agrícolas pueden manifestarse a partir de configuraciones que van desde monocultivos intensivos de alta densidad hasta sistemas agroforestales complejos y diversificados. Dichas configuraciones se determinan por múltiples factores, tales como la disponibilidad



de recursos técnicos y financieros, así como por la evolución de las demandas en mercados internacionales, especialmente el notable incremento en los precios del cacao, que en 2025 alcanzan cifras récord cercanas a los 10.000 USD por tonelada (International Cocoa Organization, 2024). Desde esa perspectiva, un sistema agrícola debe evaluarse por su eficiencia productiva, por su contribución al desarrollo económico rural y por su capacidad para promover prácticas sostenibles que garanticen la conservación ecológica y la resiliencia socioeconómica en el largo plazo.

2.3 Sistemas de Producción Tradicional

Los sistemas productivos tradicionales corresponden a modelos agrícolas contruidos y transmitidos generacionalmente por comunidades rurales, en los cuales convergen prácticas agrícolas ancestrales profundamente adaptadas al entorno ecológico, cultural y socioeconómico local. Sistemas que se destacan por priorizar estrategias de autoconsumo y diversificación productiva, combinando de manera equilibrada cultivos principales con una variedad de especies complementarias, que cumplen múltiples funciones ecológicas, alimentarias y culturales. Ejemplos notables incluyen las fincas tradicionales, las chagras indígenas y los huertos familiares campesinos, todos ellos reflejan un conocimiento empírico refinado a través del tiempo y profundamente arraigado a la identidad comunitaria y territorial. De esa manera, los sistemas productivos tradicionales representan una fuente vital de subsistencia y resiliencia frente a cambios ambientales y socioeconómicos, y constituyen un patrimonio biocultural indispensable para la sostenibilidad rural.

2.4 Sistemas Agroforestales y Cacaocultura

Los sistemas agroforestales (SAF) constituyen arreglos productivos que combinan deliberadamente especies arbóreas perennes con cultivos agrícolas o componentes pecuarios, promoviendo sinergias ecológicas, sociales y económicas dentro del mismo espacio territorial (Nair, 1985). En el contexto específico de Tumaco, la producción de cacao se desarrolla principalmente con estos esquemas agroforestales, integrándose con especies

como el plátano y árboles maderables, configuración que ofrece múltiples beneficios ambientales, tales como la conservación de los suelos, regulación microclimática y la protección de la biodiversidad, además de permitir la diversificación de ingresos económicos para las familias productoras (Fedecacao, 2015). A pesar de esas ventajas potenciales, la ausencia o insuficiencia en la aplicación de técnicas adecuadas de manejo agronómico restringe significativamente el potencial productivo del cacao en dichos sistemas tradicionales. Por el contrario, sistemas tecnificados que implementan buenas prácticas agrícolas logran superar rendimientos de hasta 3.000 kg por hectárea al año, demostrando así la importancia crítica de la asistencia técnica especializada y el manejo agronómico intensivo para optimizar los beneficios de los sistemas agroforestales (Fedecacao, 2018).

2.5 Contexto de la Cacaocultura: Mundial, Regional y Local

2.5.1 Contexto Mundial

La cacaocultura ocupa un papel estratégico dentro de la economía agrícola tropical, con una producción global que sobrepasa anualmente los 5.2 millones de toneladas y se extiende a lo largo de más de 50 países productores (International Cocoa Organization, 2024). En ese panorama, África Occidental ejerce una posición dominante, contribuyendo con aproximadamente el 76 % de la producción mundial, siendo Costa de Marfil, con 2.2 millones de toneladas, y Ghana, con 0.9 millones, los países líderes en términos de volumen aportado. No obstante, a partir de 2025, este sector enfrenta serios desafíos derivados de condiciones climáticas adversas como las prolongadas sequías y el impacto de enfermedades emergentes, destacando entre ellas el virus del brote hinchado, que han provocado una reducción del 10 % en la producción en comparación con el año anterior (World Bank, 2024). Esta coyuntura ha generado una presión sin precedentes en el mercado internacional del cacao, elevando los precios hasta superar los 10.000 USD por tonelada, el nivel más alto registrado en las últimas décadas. Este incremento también responde a una creciente demanda global por chocolate de alta calidad, sostenible y con certificaciones ambientales y sociales, especialmente en mercados europeos y norteamericanos (International Cocoa Organization, 2024).



A escala global, los sistemas de producción cacaotera muestran una marcada diversidad en sus configuraciones técnicas y ecológicas. Por un lado, existen monocultivos intensivos caracterizados por densidades altas que oscilan entre 1.000 y 1.600 árboles por hectárea, logrando rendimientos promedio de entre 500 y 800 kg/ha/año. Por otro lado, los sistemas agroforestales tradicionales mantienen densidades inferiores a los 600 árboles por hectárea, con productividades menores, entre 300 y 500 kg/ha/año, destacándose especialmente por su contribución a la conservación ambiental (Ruf & Schroth, 2023). La expansión masiva de monocultivos, particularmente en regiones como África, se asocia a graves problemáticas ambientales como la deforestación y la pérdida de biodiversidad, generando crecientes preocupaciones en su sostenibilidad a largo plazo. En contraste, los sistemas agroforestales que predominan en regiones como Asia y América Latina adquieren progresiva importancia debido a sus notables beneficios ecológicos, como la capacidad de secuestrar carbono atmosférico, preservar la biodiversidad y contribuir a la resiliencia climática y económica de las comunidades rurales (Ruf & Schroth, 2023). Esta transición hacia modelos más sostenibles se refleja también en el ámbito comercial, ya que aproximadamente el 25 % de la producción mundial de cacao cuenta hoy en día con certificaciones socioambientales reconocidas internacionalmente, como Rainforest Alliance o Fairtrade, que responden a una demanda creciente por productos éticos y ambientalmente responsables (Meyers, 2021).

2.5.2 Contexto Regional: Latinoamérica

La producción cacaotera en América Latina ocupa una posición única dentro del mercado internacional, especialmente por su énfasis en variedades finas de aroma, un segmento de alta calidad que representa aproximadamente el 80 % del mercado mundial de esta categoría (International Cocoa Organization, 2023). En términos productivos, esta región genera cerca de 900.000 toneladas anuales, lo que corresponde al 18 % del volumen total de cacao a nivel global. Entre los países líderes se destacan Ecuador, con una producción aproximada de 350.000 toneladas anuales, Perú con 150.000 toneladas y Brasil con 120.000 toneladas, constituyéndose así en los actores más relevantes del mercado regional (FAO, 2023).

La producción latinoamericana se caracteriza principalmente por sistemas agroforestales diversificados, en los cuales el cultivo del cacao se asocia frecuentemente con especies complementarias como plátano, café y diversas especies maderables. Estos sistemas suelen manejar densidades arbóreas de entre 400 y 800 árboles por hectárea, obteniendo rendimientos promedio que fluctúan entre los 300 y 600 kg/ha/año (Cabral et al., 2021). Esta configuración agroforestal permite una producción sostenible y adaptada a las condiciones ecológicas regionales, pero también genera múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales, que consolida a América Latina como un referente global en prácticas sostenibles de producción cacaotera.

El significativo incremento de los precios internacionales del cacao registrado durante 2024 ha representado un estímulo decisivo para las exportaciones latinoamericanas, alcanzando un valor aproximado de 4.500 millones de dólares. Este crecimiento económico se explica principalmente por una creciente preferencia global hacia productos de cacao que poseen certificaciones de trazabilidad, sostenibilidad y responsabilidad social, las cuales posicionan favorablemente a la región dentro del mercado mundial (International Cocoa Organization, 2024). No obstante, América Latina enfrenta diversos desafíos que condicionan su potencial productivo, entre ellos destaca la insuficiente incorporación tecnológica en muchos sistemas tradicionales, así como los impactos cada vez más evidentes del cambio climático, especialmente en zonas vulnerables como la Amazonia peruana y ecuatoriana, donde se han reportado disminuciones significativas en los rendimientos agrícolas debido a la variabilidad climática (Somarriba et al., 2018).

En este sentido, Mata et al. (2022) señalan que, aunque los sistemas agroforestales diversificados en Brasil muestran una notable resiliencia ecológica frente a perturbaciones ambientales, requieren de mayores inversiones y fortalecimiento tecnológico para poder competir efectivamente con los modelos de monocultivo intensivo predominantes en regiones africanas.



2.5.3 Contexto Local: Colombia, Nariño y Tumaco

En Colombia, la cacaocultura se ha consolidado como un pilar estratégico para el desarrollo rural sostenible y la construcción de paz territorial. En 2024, el país alcanzó una producción de 72.500 toneladas de cacao, registrando un incremento del 5 % respecto al año anterior; lo que lo posiciona como el décimo productor a nivel mundial (Federación Nacional de Cacaoteros, 2025). Este logro no es menor si se considera que el 95 % del cacao colombiano pertenece a la categoría de fino de aroma, atributo que confiere al país una ventaja distintiva en los mercados internacionales más exigentes.

Los sistemas productivos nacionales abarcan desde cultivos tradicionales de baja densidad con 200 a 400 árboles por hectárea y rendimientos inferiores a 400 kilogramos por hectárea al año hasta modelos tecnificados que superan los 1.000 árboles y producen más de 800 kilogramos anuales. Sin embargo, el promedio nacional, situado en 550 kilogramos, evidencia la necesidad de fortalecer las capacidades productivas para alcanzar el punto de equilibrio estimado en 1.500 kilogramos por hectárea (Federación Nacional de Cacaoteros, 2018). En medio de este escenario, cada plantación de cacao, con su verde follaje y su aroma dulce en ciernes, simboliza un medio de vida y un acto silencioso de resistencia y renovación social.

Desde la firma de los Acuerdos de Paz en 2016, el cacao ha emergido como una alternativa productiva vital, beneficiando a más de 52.000 familias rurales en territorios históricamente afectados por la violencia y las economías ilícitas (Agencia para la Reincorporación y la Normalización, 2023). En ese contexto, cada kilogramo producido representa mucho más que un logro económico: es un paso firme hacia la consolidación de territorios más equitativos, resilientes y sostenibles. ¿Cómo no reconocer, entonces, en cada grano de cacao colombiano, el símbolo tangible de una nación que apuesta por la vida y la sostenibilidad?

Reconocerlo implica comprender que en cada almendra fermentada late la esperanza de comunidades que, contra la adversidad, han elegido sembrar futuro en vez de violencia, dignidad en vez de olvido. Implica valorar

que, en las venas mismas del cacao, se entrelazan el esfuerzo silencioso de los campesinos, el clamor de la naturaleza por ser respetada y el anhelo colectivo de un país que, desde sus raíces rurales, busca reconstruirse en armonía con su historia, su tierra y su gente.

En el municipio de Tumaco, departamento de Nariño, la cacaocultura representa un eje económico vital y una expresión viva de la identidad cultural afrodescendiente. Este territorio concentra el 93 % de las 22.000 hectáreas cultivadas con cacao en el departamento, con 18.600 hectáreas establecidas y aproximadamente 14.000 en etapa productiva (Federación Nacional de Cacaoteros, 2024). En 2024, la región alcanzó una producción de 3.600 toneladas; no obstante, los rendimientos promedio –oscilando entre 232 y 300 kilogramos por hectárea al año– reflejan profundas limitaciones edáficas, como deficiencias en fósforo, potasio y azufre, y un exceso de hierro, que afecta directamente la productividad (Universidad Nacional de Colombia, 2024).

Los sistemas agroforestales tradicionales, mayoritariamente gestionados por comunidades afrodescendientes, integran cultivos de cacao con plátano, yuca, especies maderables y, ocasionalmente, sistemas silvopastoriles. Esta diversidad, más allá de su funcionalidad agrícola, encarna una cosmovisión ancestral que vincula el uso del suelo con el respeto al territorio y la vida comunitaria. Sin embargo, las debilidades estructurales asociadas a la escasa asistencia técnica, la baja inversión institucional y el rezago histórico producto del conflicto armado, continúan restringiendo el potencial competitivo del sector (Cordeagropaz, 2019).

A pesar de este panorama, el alza sostenida de los precios internacionales del cacao y el reconocimiento creciente de la calidad del grano tumaqueño en mercados especializados abren una ventana de oportunidad singular para el desarrollo sostenible de la región. ¿Qué sentido tiene esta oportunidad para Tumaco? Significa, ni más ni menos, la posibilidad de transformar un cultivo tradicional en un eje articulador de bienestar, justicia económica y soberanía territorial. Significa creer que allí donde antes hubo olvido, hoy puede florecer una economía solidaria, sustentada en el conocimiento local, el trabajo digno y la dignificación de los saberes heredados.



2.6 Tipificación de Sistemas Productivos con Cacao en el Mundo

La tipificación de los sistemas productivos de cacao (*Theobroma cacao* L.) a escala global constituye una herramienta fundamental para comprender la diversidad de prácticas agrícolas según condiciones biofísicas, contextos socioeconómicos y niveles tecnológicos. Su propósito principal es orientar estrategias de manejo más sostenibles y eficientes, que permitan mejorar la productividad sin comprometer los equilibrios ecológicos. En regiones tropicales como África Occidental, América Latina y el Sudeste Asiático –zonas que concentran la mayor parte de la producción mundial de cacao– coexisten modelos que van desde monocultivos intensivos hasta sistemas agroforestales tradicionales, cada uno con niveles variables de integración ecológica y resiliencia socioambiental.

En este marco, Ballesteros-Possú et al. (2024) destacan que la tipificación, apoyada en técnicas multivariadas, permite identificar los sistemas productivos modales, es decir, aquellos patrones representativos dentro de un territorio, facilitando así la formulación de estrategias diferenciales para su optimización. Esta clasificación no solo mejora la comprensión de las dinámicas productivas, sino que también aporta al diseño de políticas públicas más contextualizadas y a la toma de decisiones del orden técnico, económico y ambiental. En última instancia, tipificar es reconocer la pluralidad de realidades rurales y avanzar hacia una agricultura del cacao que sea inteligente, equitativa y adaptativa frente a los desafíos globales.

A escala internacional, diversos estudios han documentado la relevancia de los sistemas agroforestales con cacao como estrategias efectivas para la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. Rice y Greenberg (2000) identificaron dos tipologías predominantes: los sistemas tradicionales diversificados, caracterizados por una alta heterogeneidad de especies arbóreas, y los sistemas simplificados de sombra, en los que se reduce la diversidad vegetal a favor de especies comercialmente valiosas o de rápido crecimiento. Esta clasificación ha sido fundamental para valorar el papel del cacao en paisajes sostenibles.

En años recientes, la tipificación de estos sistemas ha evolucionado para incorporar variables económicas e institucionales, como el acceso a mercados diferenciados y la adopción de certificaciones ambientales (orgánica, Rainforest Alliance, entre otras). Como señala Meyers (2021), estos factores no solo inciden en la rentabilidad de los productores, sino que también condicionan la adopción de prácticas sostenibles, al alinear los incentivos productivos con exigencias ambientales y sociales. De este modo, la tipificación no es únicamente un ejercicio técnico de categorización, sino una herramienta para comprender las interacciones entre sostenibilidad ecológica, inclusión comercial y decisiones territoriales.

En África Occidental, región que concentra aproximadamente el 76 % de la producción mundial de cacao (International Cocoa Organization, 2024), predominan los sistemas de monocultivo intensivo, especialmente en países como Costa de Marfil y Ghana. Estos modelos se caracterizan por altas densidades de siembra entre 1.000 y 1.600 árboles por hectárea, así como por el uso extensivo de insumos químicos, lo que permite alcanzar rendimientos de entre 500 y 800 kilogramos por hectárea al año. No obstante, estas prácticas han generado serios desafíos ambientales, entre ellos la deforestación acelerada y el agotamiento de los suelos agrícolas (Ruf & Schroth, 2004).

La tipificación de los sistemas productivos en esta región, como lo señalan Bymolt et al. (2018), se estructura principalmente a partir del grado de tecnificación y del nivel de dependencia de fertilizantes y agroquímicos. Estos autores identifican tres tipos principales de sistemas: el intensivo-tecnificado, caracterizado por altos insumos y renovación periódica de cultivos; el semi-intensivo, con moderada intervención tecnológica; y el tradicional de baja densidad, aún vinculado a prácticas extensivas y menor dependencia externa. Comprender esta diversidad permite dimensionar las dinámicas productivas actuales y anticipar los retos de sostenibilidad que enfrenta la región frente a un mercado global cada vez más exigente en estándares ambientales.



En América Latina, los sistemas agroforestales con cacao representan una estrategia ampliamente adoptada, especialmente en países como Ecuador, Perú y Brasil, donde la agricultura sostenible se articula con la conservación de la biodiversidad. En Brasil, Cabral et al. (2021) tipificaron los sistemas productivos de cacao según la composición del paisaje, al identificar arreglos silvoagrícolas en los que el cacao se integra con cultivos de plátano y especies maderables. Estos sistemas, con densidades de entre 400 y 600 árboles por hectárea, alcanzan rendimientos promedio de 300 a 600 kilogramos por hectárea al año. Aunque priorizan la diversidad biológica y la resiliencia frente al cambio climático, su productividad sigue limitada por niveles relativamente bajos de inversión tecnológica.

En Ecuador, Mata et al. (2018) describieron una diferenciación interna dentro de los sistemas agroforestales de cacao fino de aroma, clasificándolos en tradicionales con densidades inferiores a 500 árboles por hectárea y comerciales con más de 800 árboles por hectárea, diferenciación que refleja tanto prácticas agronómicas como contextos socioeconómicos diversos de los productores. Estas tipologías subrayan que, más allá de las condiciones agroecológicas, las dinámicas de mercado, la capacidad de innovación y las trayectorias históricas de los territorios son factores determinantes en la evolución de los sistemas de producción de cacao en la región.

2.7 Tipificación de Sistemas Productivos con Cacao en Colombia

En el contexto colombiano, el cultivo de cacao ha adquirido una relevancia estratégica, especialmente tras la firma de los Acuerdos de Paz en 2016, al posicionarse como una alternativa productiva frente a la economía de los cultivos ilícitos. Según la Agencia para la Reincorporación y la Normalización (2023), los sistemas agroforestales con cacao han desempeñado un papel crucial en los procesos de sustitución voluntaria de coca, que configuraron tipologías que van desde huertos mixtos de subsistencia hasta sistemas comerciales orientados a la exportación. Esta diversidad refleja las condiciones agroecológicas, la historia del conflicto y los niveles de

asociatividad en los territorios. Sin embargo, persisten barreras estructurales como la baja adopción tecnológica y los rendimientos limitados en promedio, 550 kilogramos por hectárea al año que restringen la competitividad del sector frente a estándares internacionales (Federación Nacional de Cacaoteros, 2024).

Colombia cuenta con un alto potencial productivo, sustentado en la calidad de su grano: el 95 % del cacao nacional es clasificado como fino de aroma, lo que le confiere una ventaja comparativa en los mercados especializados (Federación Nacional de Cacaoteros, 2025). La tipificación de los sistemas productivos en el país refleja una notable heterogeneidad influenciada por factores regionales, históricos y sociales. Un estudio de Ramírez et al. (2014) hecho en el departamento de Norte de Santander identificó tres categorías principales: sistemas tradicionales con densidades de 200 a 400 árboles por hectárea y rendimientos inferiores a 400 kg/ha/año; sistemas semitecnificados, que oscilan entre 600 y 800 árboles por hectárea con producciones de hasta 700 kg/ha/año; y sistemas tecnificados que superan los 1.000 árboles por hectárea y alcanzan rendimientos superiores a 800 kg/ha/año. Estas tipologías permiten clasificar y también proponer rutas de transición productiva acordes con las particularidades de cada territorio. En ese sentido, el cacao en Colombia no es simplemente un cultivo: es un vehículo de reconciliación, sostenibilidad y transformación territorial.

Espinal et al. (2005), en su caracterización de la cadena productiva del cacao en Colombia, evidencian que los sistemas tradicionales tienden a concentrarse en zonas rurales habitadas por comunidades indígenas y afrodescendientes, donde persiste una fuerte dependencia de prácticas heredadas, baja mecanización y escaso acceso a servicios públicos y asistencia técnica. En contraste, los sistemas tecnificados se desarrollan principalmente en regiones con mejores condiciones de infraestructura, conectividad vial, presencia institucional y acceso a mercados, que reflejan una distribución inequitativa del desarrollo agrícola.



Por su parte, Mantilla et al. (2000), en un estudio realizado en el departamento de Santander, propusieron una tipificación basada en el tamaño de la finca y el nivel de inversión, previa identificación de cuatro categorías diferenciadas: pequeños productores tradicionales, medianos diversificados, pequeños tecnificados y grandes sistemas comerciales. Esta clasificación permite visibilizar tanto la heterogeneidad estructural del sector cacaotero como los distintos niveles de capitalización, manejo técnico y vinculación con las cadenas de valor. En conjunto, dichas tipologías revelan cómo el acceso a tecnología, conocimiento y apoyo institucional ha profundizado brechas entre productores, haciendo evidente que la sostenibilidad del cacao en Colombia requiere enfoques diferenciados y territorialmente sensibles.

2.8 Tipificación de Sistemas Productivos con Cacao en Tumaco, Nariño

El municipio de Tumaco, en el departamento de Nariño, constituye uno de los principales núcleos cacaoteros de Colombia, concentrando el 93 % de las 22.000 hectáreas cultivadas en la región (Federación Nacional de Cacaoteros, 2024). La producción tumaqueña, ampliamente reconocida por su calidad de fino de aroma, se desarrolla principalmente con sistemas agroforestales tradicionales, gestionados de manera ancestral por comunidades afrodescendientes. Sistemas que representan una estrategia productiva, al igual que una expresión de identidad cultural, resiliencia territorial y manejo sostenible de los recursos naturales.

La tipificación de los sistemas de producción en Tumaco ha sido objeto de diversos estudios locales, los cuales han documentado su notable diversidad estructural y funcional. Estas investigaciones han permitido visibilizar desde pequeños huertos de subsistencia familiar, donde el cacao se asocia con cultivos alimentarios y especies maderables, hasta arreglos agroforestales más especializados, orientados a mercados diferenciados. En este entramado, comprender la dinámica productiva de Tumaco implica reconocer que el cacao, más allá de su valor económico, es también una herramienta de resistencia comunitaria y un eje estratégico para la

construcción de alternativas de desarrollo sostenible en un territorio históricamente afectado por el conflicto y la exclusión.

Espinosa-Álzate y Ríos-Osorio (2016) llevaron a cabo una caracterización agroecológica de los sistemas productivos de cacao en Tumaco, clasificándolos en dos grandes tipologías: los sistemas tradicionales complejos y los sistemas comerciales modernos. Los primeros, de baja densidad con menos de 400 árboles por hectárea, se caracterizan por su integración con cultivos de plátano y especies maderables, conforman paisajes agroforestales de alta diversidad biológica. En contraste, los segundos con altas densidades de siembra, superiores a 800 árboles por hectárea, presentan un manejo más intensivo, basado en el uso de insumos químicos para incrementar la productividad. |

Mediante la aplicación del método MESMIS, los autores evidenciaron que los sistemas tradicionales, pese a registrar menores niveles de productividad en comparación con los sistemas comerciales modernos, ofrecen mayores ventajas en términos de sostenibilidad ambiental, resiliencia ecológica y servicios ecosistémicos. Estos hallazgos subrayan la importancia de valorar los indicadores de rendimiento económico y los atributos que fortalecen la estabilidad de los sistemas productivos en territorios social y ambientalmente vulnerables como Tumaco. En última instancia, apostar por sistemas más sostenibles implica reconocer que el cacao puede ser rentable y, a la vez, un aliado estratégico para la conservación del patrimonio natural y cultural del Pacífico colombiano.

Montoya-Restrepo et al. (2015) analizaron las oportunidades productivas del cacao en Tumaco, y tipificaron los sistemas en función de su potencial comercial. Identificaron dos categorías principales: los sistemas tradicionales de subsistencia, caracterizados por huertos mixtos donde el cacao convive con cultivos de plátano y coco, y los sistemas semicomerciales, orientados hacia los mercados locales, con mayores niveles de manejo agronómico y organización productiva. Esta diferenciación permitió visibilizar trayectorias de transición productiva en las comunidades afrodescendientes de la región.



Por su parte, Angulo (1992), en una investigación pionera en la cuenca del río Mejicano, documentó arreglos silvoagrícolas que integraban cacao, plátano y especies maderables como el cedro (*Cedrela odorata* L.). Su propuesta de mejoras técnicas apuntaba a incrementar la rentabilidad de estos sistemas sin comprometer su diversidad ecológica. Los estudios, a pesar de pertenecer a diferentes momentos históricos, coinciden en resaltar que la sostenibilidad del cacao en Tumaco depende de estrategias que reconozcan la multifuncionalidad de los sistemas agroforestales y la necesidad de fortalecer el acceso a mercados diferenciados y la asistencia técnica territorializada.

La Universidad Nacional de Colombia (2024) reporta que los sistemas de producción de cacao en Tumaco enfrentan importantes desafíos edáficos, entre los que destacan la deficiencia de nutrientes esenciales como fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) y la presencia excesiva de hierro en los suelos, factores que inciden directamente en los bajos niveles de productividad, estimados en un promedio de 232 kg/ha/año. Estas limitaciones, aparte de ser agroecológicas, reflejan históricas brechas en asistencia técnica, acceso a insumos y transferencia de tecnologías adaptadas al territorio.

En respuesta a esta problemática, procesos de tipificación participativa han permitido diseñar estrategias diferenciadas según el estado y la capacidad productiva de las fincas. Según Preciado et al. (2011), se han definido tres líneas de acción: rehabilitación de cacaotales envejecidos en unidades de baja tecnología, implementación de prácticas agronómicas adecuadas para fincas de producción media, y formulación de estrategias de mantenimiento y optimización diferencial para las diversas combinaciones de cultivos y escenarios productivos. Enfoque que reconoce la heterogeneidad intrínseca de los sistemas de Tumaco y orienta las intervenciones hacia modelos de producción más sostenibles, resilientes y competitivos.

La tipificación de los sistemas productivos de cacao del orden global revela una dicotomía persistente entre productividad y sostenibilidad: mientras los sistemas intensivos priorizan el volumen de producción mediante el uso de insumos y tecnologías de alto impacto, los sistemas agroforesta-

les tradicionales apuestan por la conservación de la biodiversidad y la resiliencia ecológica. En Colombia, esta tensión se expresa de manera singular, modulada por factores sociales históricos como el conflicto armado, la marginalidad rural y la limitada capacidad de innovación tecnológica en amplios sectores cacaoteros.

En Tumaco, la prevalencia de sistemas tradicionales de baja productividad refleja un rezago tecnológico y un potencial productivo subexplotado. Este potencial adquiere mayor relevancia en el contexto actual, marcado por el auge de los precios internacionales del cacao que alcanzaron los 10.000 dólares por tonelada en 2024, y también por la creciente demanda de cacao sostenible en los mercados globales. Sin embargo, la ausencia de políticas públicas diferenciadas, sumada a las deficiencias en asistencia técnica y extensión rural, continúa limitando la transición hacia sistemas más competitivos y sostenibles, especialmente en territorios vulnerables como Tumaco. Promover esta transición implica mejorar rendimientos y construir condiciones estructurales que dignifiquen el trabajo rural, respeten los saberes tradicionales y fortalezcan la sostenibilidad social, económica y ambiental del cacao colombiano.

2.9 Agroforestería

La agroforestería, entendida como la integración deliberada de cultivos agrícolas con especies arbóreas en un mismo espacio productivo, posee raíces milenarias en las prácticas de comunidades indígenas y campesinas de regiones tropicales, mucho antes de su formalización como disciplina científica. Nair (1985) documentó su presencia en Mesoamérica, donde los mayas, ya en el siglo IV, desarrollaban sistemas de cultivo que combinaban cacao con árboles de sombra; igual, en diversas regiones de África implementaban sistemas agrícolas en terrazas con asociaciones arbóreas. No obstante, el estudio sistemático de la agroforestería no se consolidó sino hasta la década de 1970, impulsado por la creciente preocupación frente a la deforestación y el agotamiento de suelos ocasionados por los modelos agrícolas intensivos (José, 2012).



La creación del Consejo Internacional para la Investigación en Agroforestería (ICRAF) en 1977, junto con los avances del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Costa Rica, marcó un hito en su institucionalización científica, promoviendo la definición de tipologías, la evaluación de impactos ecosistémicos y el diseño de sistemas adaptados a diversas realidades socioclimáticas (ICRAF, 2024). En las últimas décadas, el avance del cambio climático y la creciente demanda de sistemas agrícolas sostenibles han elevado la agroforestería de estrategia alternativa a enfoque central en las agendas de desarrollo rural, resiliencia climática y seguridad alimentaria (Altieri & Nicholls, 2020). Reconocer esta evolución histórica es fundamental para valorar el cacao agroforestal como un producto agrícola y como parte de un legado civilizatorio orientado a la coexistencia armónica entre producción y naturaleza.

La Universidad de Nariño, una de las instituciones pioneras en la creación de la carrera de Ingeniería Agroforestal en Colombia, define la agroforestería como la ciencia que estudia, diseña, implementa y evalúa sistemas productivos en la que interactúan de manera intencionada componentes agrícolas, forestales y, en algunos casos, pecuarios en una misma unidad de manejo. Perspectiva que integra enfoques ecológicos, socioeconómicos y tecnológicos para promover sistemas sostenibles que favorecen tanto la conservación ambiental como la seguridad alimentaria y el desarrollo rural.

Desde su fundación, el programa de Ingeniería Agroforestal en esta universidad ha desempeñado un papel central en la formación de profesionales con enfoque territorial, capaces de responder a los desafíos de producción sostenible en regiones de alta biodiversidad como el suroccidente colombiano. Esta visión científica y aplicada de la agroforestería ha sido fundamental para articular conocimientos ancestrales, innovación tecnológica y planificación ambiental en contextos donde la sostenibilidad no es una opción, sino una necesidad estructural.

2.9.1 Sistemas Agroforestales

Los sistemas agroforestales se definen como modelos de manejo integrado del suelo que combinan intencionalmente especies arbóreas perennes –tales como árboles, arbustos y palmas– con cultivos agrícolas y, en algunos casos, actividades ganaderas, dentro de una misma unidad de terreno. El objetivo es optimizar las interacciones ecológicas y económicas entre sus componentes, promoviendo un uso más eficiente y sostenible de los recursos naturales (Nair, 1993). Integración deliberada que permite potenciar funciones ecosistémicas como el reciclaje de nutrientes, la regulación hídrica y la captura de carbono, mientras diversifica las fuentes de ingreso de los productores rurales.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2023) resalta que los sistemas agroforestales constituyen una práctica dinámica, capaz de adaptarse a las condiciones culturales, ambientales y socioeconómicas de las comunidades locales, integrando la producción de alimentos con la conservación de los recursos naturales. En el contexto específico del cacao (*Theobroma cacao* L.), la agroforestería se traduce en sistemas diversificados donde el cultivo de cacao se asocia con especies como plátano, café, aguacate o maderables de alto valor comercial, configurando matrices productivas que mejoran la resiliencia frente al cambio climático, incrementan la biodiversidad local y fortalecen la sostenibilidad de los medios de vida rurales (Somarriba et al., 2018). Comprender la agroforestería desde este aspecto es clave para diseñar estrategias productivas que articulen rentabilidad económica, sostenibilidad ecológica y justicia territorial.

Otras definiciones, provenientes de diversas fuentes académicas y sectoriales, enriquecen la comprensión de los sistemas agroforestales. Nair (1985) los conceptualiza como el conjunto de sistemas de uso de la tierra en los cuales especies leñosas perennes árboles, arbustos, entre otros –crecen en asociación con plantas herbáceas cultivos agrícolas o pastos– y/o animales, ya sea en disposiciones espaciales simultáneas o en rotaciones temporales, donde ocurren interacciones tanto ecológicas como económicas entre los componentes arbóreos y no arbóreos.



La Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao, 2015) ofrece una definición complementaria, al señalar que un sistema agroforestal implica la asociación en el tiempo y el espacio de dos o más especies en una misma área, con la condición de que al menos una de ellas sea una especie leñosa perenne, y que dicha asociación genere interacciones de carácter ecológico y económico. Esta perspectiva enfatiza la integración funcional de los componentes productivos en el paisaje rural.

Desde una visión más aplicada, Prodesoc (2006) describe los sistemas agroforestales como una actividad productiva sustentada en condiciones climáticas favorables, que permite simultáneamente la producción agrícola y la conservación del medio ambiente. En una línea similar, Fedecacao (2018) destaca que el cultivo de cacao asociado con especies maderables, frutales y musáceas contribuye a la sostenibilidad ecológica e incrementa el valor económico por unidad de área cultivada, al convertirse en una estrategia más lucrativa y resiliente frente a las fluctuaciones de los mercados agrícolas.

En suma, estas definiciones reflejan que los sistemas agroforestales, más allá de su configuración técnica, representan una estrategia productiva que articula sostenibilidad ambiental, rentabilidad económica y adaptación socioterritorial, pilares esenciales para el desarrollo rural en contextos de alta biodiversidad como el Pacífico colombiano.

2.10 Evaluación Económica de los Sistemas Agroforestales

Para que los sistemas agroforestales sean adoptados de manera sostenible en las comunidades rurales deben cumplir de forma simultánea tres condiciones fundamentales: ser económicamente viables, socialmente aceptables y ambientalmente sostenibles. Esta tríada de criterios garantiza que los sistemas generen ingresos adecuados para los productores, respeten las dinámicas culturales locales y contribuyan a la conservación de los ecosistemas.

En este contexto, la evaluación económica se convierte en una herramienta indispensable para medir y comparar los múltiples costos y beneficios

asociados a la implementación de sistemas agroforestales, independientemente de la configuración productiva adoptada. Según Fedecacao (2018), la evaluación permite asignar valores cuantitativos en términos financieros tanto a los bienes tangibles como a los servicios ecosistémicos generados, utilizando como referencia los precios del mercado. Esa aproximación facilita la toma de decisiones racionales, orientadas a maximizar la rentabilidad del sistema sin comprometer su equilibrio ambiental ni su legitimidad social. Evaluar económicamente un sistema agroforestal, por tanto, es evaluar su capacidad de ser, simultáneamente, fuente de ingresos, garante de biodiversidad y motor de transformación territorial.

Hernández et al. (2018) destacan que la evaluación económica constituye un instrumento fundamental para analizar la viabilidad de proyectos productivos y para gestionar de manera eficiente los recursos naturales. Esa herramienta ofrece criterios cuantitativos que permiten asignar prioridades en el uso de los recursos, orientando las decisiones económicas de las comunidades hacia alternativas más sostenibles y rentables en función de su contexto ambiental y social (Conabio, 1998).

Así también, diversos estudios han evidenciado que los métodos y criterios utilizados en la evaluación de masas forestales provenientes de la silvicultura y el ordenamiento forestal coinciden, en sus aspectos más generales, con aquellos aplicados a los sistemas agrarios. Ambos enfoques buscan optimizar la productividad, garantizar la sostenibilidad ecológica y promover un aprovechamiento racional de los recursos, lo que refuerza la pertinencia de aplicar instrumentos de evaluación económica integral en los sistemas agroforestales. Así, la valoración de bienes y servicios ambientales no solo es compatible entre sectores, sino que es imprescindible para construir estrategias de manejo que armonicen la producción con la conservación.

Por tanto, como plantea la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao, 2013) en su Plan Decenal Cacaotero, uno de los objetivos estratégicos es que Colombia se posicione como un protagonista de clase mundial en el mercado de cacao fino y de aroma. Para alcanzar esa meta, el plan propone incrementar la productividad promedio nacional de 309 kg/ha/año



a 1.500 kg/ha/año, cifra considerada el punto de equilibrio productivo y económico del cultivo.

El punto de equilibrio se define como el nivel de producción y ventas en el cual los ingresos totales igualan a los costos totales, de modo que la utilidad operacional es igual a cero (Hornngren, Datar, & Rajan, 2012; Mora, 2019). En este nivel, el productor cubre los costos variables, como mano de obra, insumos y transporte, así como los costos fijos de infraestructura, equipos y servicios financieros; no incurre en pérdidas, pero tampoco genera utilidades netas. Alcanzar y superar el punto de equilibrio es, por tanto, una condición indispensable para la sostenibilidad económica del sector cacaotero colombiano en los mercados internacionales de cacao premium, donde además de cantidad, se exige calidad, trazabilidad y sostenibilidad ambiental.

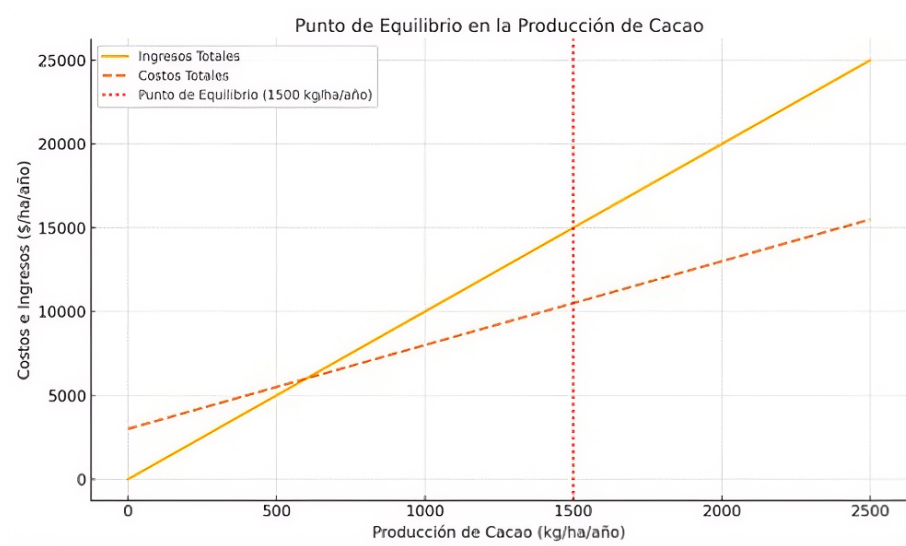


Figura 1. Punto de equilibrio calculado para el municipio de Tumaco a la fecha de realizar este estudio

La figura 1 representa la relación entre los niveles de producción de cacao (kg/ha/año) y los ingresos y costos asociados a esa producción. La línea amarilla corresponde a los ingresos totales, calculados al multiplicar el

volumen de producción por el precio promedio del cacao en el mercado. La línea punteada representa los costos totales, que incluyen tanto los costos fijos (inversión anual en infraestructura, administración, mantenimiento) como los costos variables (mano de obra, insumos agrícolas, transporte) asociados a cada kilogramo de cacao producido.

El Punto de Equilibrio señalado por la línea vertical roja en 1.500 kg/ha/año indica el nivel de producción a partir del cual los ingresos igualan a los costos totales. Antes de este punto, los costos superan los ingresos y el sistema opera en pérdida; después de alcanzarlo, la producción adicional genera utilidades netas para el productor. En el caso del cacao colombiano, especialmente en Tumaco, lograr superar la barrera de 1.500 kg/ha/año es fundamental para asegurar la rentabilidad económica del sistema agroforestal, al maximizar los beneficios sin comprometer la sostenibilidad ambiental ni la viabilidad social del cultivo.

Hay que tener en cuenta que en Tumaco y Colombia existe una fluctuación fuerte del valor del kilogramo de cacao y los costos de la mano de obra; por lo tanto, el punto de equilibrio no es estático, si no que ajusta de acuerdo a situaciones puntuales. Lo que indica que, entender el punto de equilibrio permite evaluar la factibilidad económica de los sistemas agroforestales con base en cacao y otros productos, así como diseñar estrategias de mejora productiva y de acceso a mercados que aseguren ingresos reales y estables para los pequeños productores.

2.11 Métodos de Valoración de Variables de Caracterización

En los procesos de caracterización de sistemas productivos, las variables analizadas pueden clasificarse, de acuerdo con su naturaleza, en cuantitativas y cualitativas. Las variables cuantitativas son aquellas que permiten medir propiedades tangibles, susceptibles de ser expresadas numéricamente y sometidas a operaciones matemáticas y estadísticas. Estas variables ofrecen datos precisos que facilitan la comparación, la predicción y la evaluación de tendencias (Gallopín, 2006; Masera et al., 2008).



Por otro lado, las variables cualitativas se utilizan para valorar propiedades o atributos de naturaleza subjetiva, que no son directamente medibles en términos numéricos, pero que resultan fundamentales para interpretar comportamientos, percepciones y dinámicas socioambientales. Estas variables, aunque menos objetivas en su representación, aportan profundidad interpretativa y permiten capturar dimensiones esenciales como la aceptación cultural de un sistema, la percepción de los productores en los cambios productivos o la resiliencia comunitaria frente a las transformaciones territoriales.

Reconocer y valorar adecuadamente ambas categorías de variables resulta crucial para construir caracterizaciones integrales y pertinentes, que orienten la planificación, la intervención y el monitoreo de sistemas agroforestales en contextos complejos y dinámicos.

Las variables, independientemente de su naturaleza cuantitativa o cualitativa, pueden ser medidas y analizadas mediante rangos ordenados, expresados a través de relaciones de comparación tales como “mayor que” o “menor que”. Esta forma de organización facilita la construcción de escalas que permiten evaluar propiedades o atributos en función de su intensidad, frecuencia o magnitud relativa.

Es importante señalar que la distinción entre variables cualitativas y cuantitativas no responde únicamente a criterios inherentes a las propiedades de la realidad observada, sino que también está determinada por los fines teóricos y prácticos de cada investigación (Coronado, 2007). Así, una misma característica puede ser tratada de manera distinta según el enfoque metodológico adoptado o el propósito específico del estudio. Comprender esta flexibilidad conceptual es fundamental para diseñar instrumentos de caracterización que capturen de manera adecuada la complejidad de los sistemas agroforestales, integrando tanto dimensiones objetivas como percepciones, valoraciones culturales y dinámicas territoriales.

2.12 Análisis Multivariado

El análisis multivariado constituye un conjunto de técnicas estadísticas orientadas a examinar simultáneamente múltiples variables asociadas a un conjunto de objetos de estudio. Un rasgo común en sus aplicaciones es que cada objeto ya sea un individuo, un espécimen, un taxón, una comunidad ecológica o un cuadrante geográfico es descrito por una serie de atributos cuantitativos y/o cualitativos (Palacio et al., 2020). La elección, tanto de los objetos como de las variables a considerar, depende directamente de las preguntas de investigación planteadas y de la naturaleza de los fenómenos que se busca analizar.

Estas técnicas permiten explorar patrones de asociación, diferenciar grupos homogéneos dentro de poblaciones complejas, reducir la dimensionalidad de los datos, o identificar variables clave que explican la variabilidad observada. En el contexto de la tipificación de sistemas agroforestales, el análisis multivariado se convierte en una herramienta esencial para construir clasificaciones objetivas y fundamentadas, que integren la heterogeneidad biofísica, productiva y socioeconómica presente en los territorios rurales. Su adecuada aplicación mejora la comprensión de la diversidad de los sistemas productivos y también orienta la formulación de estrategias de intervención diferenciadas y contextualizadas.

Los métodos de clasificación pueden ser univariados o multivariados, dependiendo del número de variables consideradas en el análisis. Mientras los enfoques univariados se basan en el estudio de una sola variable a la vez, los métodos multivariados permiten integrar simultáneamente múltiples variables, capturando así la complejidad inherente a los sistemas agroecológicos. De acuerdo con Valerio et al. (2004), los análisis multivariados son cada vez más aplicados en estudios de tipificación productiva debido a su capacidad para incorporar un enfoque sistémico, que relacionan las variables del sistema finca con su entorno circundante.

Esta aproximación facilita la asociación de diversas variables con un mismo fenómeno, por cuanto permite desarrollar criterios de clasificación



más robustos basados en un número limitado de indicadores clave, seleccionados a partir de información complementaria. De este modo, los métodos multivariados enriquecen el análisis y promueven una comprensión más holística y operativa de los sistemas agroforestales, esencial para diseñar estrategias de manejo diferenciadas y sostenibles en territorios rurales complejos.

Según De la Fuente (2011), el análisis multivariado tiene como propósito fundamental encontrar patrones de similitud entre objetos de estudio a partir de las variables consideradas. Estos patrones permiten agrupar los objetos en conjuntos homogéneos, de modo que los elementos dentro de un mismo grupo presenten mayores similitudes entre sí que con los pertenecientes a otros grupos. El proceso de agrupamiento resulta esencial para la construcción de tipologías que reflejen la diversidad real dentro de poblaciones complejas.

Adicionalmente, el análisis multivariado pretende identificar las variables que explican mejor las diferencias entre los grupos formados, ya que permiten establecer criterios de discriminación que faciliten la interpretación y la toma de decisiones. Esa doble función, agrupamiento y discriminación, se convierte al análisis multivariado en una herramienta estratégica para comprender, clasificar y gestionar la heterogeneidad inherente a los sistemas agroforestales, en especial en contextos territoriales dinámicos como los rurales.

2.12.1 Análisis de Correspondencias

El análisis de correspondencias es una técnica descriptiva o exploratoria cuyo objetivo es resumir una gran cantidad de datos en un número reducido de dimensiones, con la menor pérdida de información posible. Su objetivo es similar al de los métodos factoriales, pero en el caso del análisis de correspondencias el método se aplica sobre variables categóricas u ordinales (De la Fuente, 2011).

Si se trata de una tabla de contingencia de dos variables cualitativas, una variable cuyas categorías aparecen en filas y la otra variable cuyas

categorías son representadas en columnas, el análisis de correspondencias consiste en resumir la información presente en las filas y columnas de manera que pueda proyectarse sobre un subespacio reducido, y representarse simultáneamente los puntos fila y los puntos columna, pudiéndose obtener conclusiones sobre relaciones entre las dos variables nominales u ordinales de origen (De la Fuente, 2011).

La extensión del análisis de correspondencias simples al caso de varias variables nominales (tablas de contingencia multidimensionales) se denomina Análisis de Correspondencias Múltiples, y utiliza los mismos principios generales que la técnica anterior. En general se orienta a casos en los cuales una variable representa ítems o individuos y el resto son variables cualitativas u ordinales que representan cualidades (De la Fuente, 2011).

El análisis de correspondencias múltiples se utiliza en el análisis de tablas de individuos descritos por variables categóricas. En este estudio se tiene una tabla de más de mil productores descritos por las actividades que le realizan al sistema productivo de cacao, las cuales son categóricas ordinales y modalidades A, B, C o D. Corresponde entonces a la construcción de perfiles socio-productivo de agricultores, para los cuales las variables han sido categorizadas (De la Fuente, 2011).

El análisis de correspondencia genera espacios factoriales en función de la información presente tanto en las filas como en las columnas, mediante relaciones matemáticas, obteniéndose de esta manera “la mejor representación simultánea” entre las modalidades que conforman las diferentes variables en estudio (Etxeberría et al., 1995; Phillips 1995; Cuadras, 1996).

Este análisis (ACM) compara individuos a través de las modalidades de las variables. Encuentra asociaciones entre variables a través de las modalidades de ellas. Es el método apropiado para abordar el análisis multivariado de las encuestas y para explotar bases de datos con información cualitativa (De la Fuente, 2011).



2.12.2 Análisis Clúster

El análisis clúster AC es un conjunto de técnicas multivariantes utilizadas para clasificar un conjunto de individuos en grupos homogéneos. Es un método estándar del análisis multivariado que puede reducir una compleja cantidad de información en pequeños grupos o clústeres, donde los miembros de cada uno de ellos comparten características similares (Lin y Chen, 2006).

El AC se considera una técnica eminentemente exploratoria que no utiliza ningún tipo de modelo estadístico para llevar a cabo el proceso de clasificación Hair et al., (1999); Peterson (2002), por ello, se le podría calificar como una técnica de aprendizaje no supervisado, es decir, una técnica muy adecuada para extraer información de un conjunto de datos sin colocar restricciones previas en forma de modelos estadísticos (Barrios y Carvajal, 2006).

El AC tiene por objeto formar grupos o clústeres homogéneos en función de las similitudes o similaridades entre ellos Peña (2002). Los grupos se forman de tal manera que cada objeto es parecido a los que hay dentro del clúster con respecto a algún criterio de selección predeterminado (Rao y Srinivas., 2006); Hair et al., (1999).

Las técnicas de agrupamiento en el AC se pueden clasificar en dos categorías: el clúster jerárquico y el no jerárquico. Los procedimientos jerárquicos consisten en la construcción de una estructura en forma de árbol. Existen dos tipos de procedimientos de obtención de clústeres jerárquicos: los de aglomeración y los divisivos. Dentro de los métodos jerárquicos aglomerativos se tienen: (i) método de encadenamiento simple, (ii) métodos de encadenamiento completo, (iii) método de encadenamiento medio, (iv) método de Ward, y (v) método del centroide (Hair et al., 1999).

Estos procedimientos difieren en la forma como se calcula la distancia entre los conglomerados, entre ellos la DEC, Manhattan, coeficiente de correlación de Pearson, Chebichev y Cosine. El clúster por medio de técnicas

no jerárquicas no requiere de procesos de construcción de árboles; en su lugar, asignan los objetos a clústeres una vez que el número de grupos a formar esté especificado. Los procedimientos de aglomeración no jerárquicos se denominan frecuentemente agrupaciones de k medias, k medianas y k modas (Heredia et al., 2012).

Para realizar un análisis clúster se debe tener en cuenta: a) una buena selección de las variables que nos van a describir a los individuos. En este sentido, un análisis de datos previo puede ser necesario o interesante. Por tanto, existe la posibilidad de combinar secuencialmente el análisis factorial y el análisis clúster; b) Definir con claridad el criterio de similitud a utilizar y c) seleccionar adecuadamente el algoritmo de clasificación (Sokal y Sneath, 1963).

2.12.2.1 Métodos de Validación de Clústeres

La validación de clústeres se puede realizar tanto interna como externamente (Todeschini, et al. 2024). La validación interna se refiere a la evaluación de la calidad de los clústeres basados en las características inherentes a los datos originales y al algoritmo de clustering utilizado. La validación externa implica comparar los resultados del clustering con alguna información externa o etiquetas conocidas de los objetos (Arbelaitz et al. 2013).

Métodos de validación interna:

De acuerdo con Halkidi et al. (2001) y Todeschini et al (2024):

Coefficiente de Silhouette: Mide qué tan bien cada objeto se ajusta a su clúster, comparando su distancia a otros objetos en el mismo clúster con la distancia a objetos en otros clústeres. Valores cercanos a 1 indican una buena asignación, mientras que valores cercanos a -1 indican que el objeto podría pertenecer a otro clúster.



La técnica de validación de Silhouette [Rousseeuw] calcula la anchura de la silhouette para cada punto objeto. Se calculan también el promedio Silhouette para todos los puntos objeto de un clúster y de todos los clústeres. La silhouette promedio puede ser utilizada para evaluar la validez de un resultado clustering y también para decidir el número de clústeres.

Índice de Davies-Bouldin: Mide la relación entre la separación promedio de los clústeres y la cohesión promedio dentro de cada clúster. Un valor más bajo indica una mejor estructura de clúster.

Índice de Calinski-Harabasz: Mide la relación entre la varianza entre clústeres y la varianza dentro de los clústeres. Un valor más alto indica una mejor estructura de clúster.

Índice de Dunn: Introducido por Joseph C. Dunn en 1974, es una métrica interna de validación de clústeres utilizada en análisis multivariado y algoritmos de clustering para evaluar la calidad de las particiones de datos (Dunn, 1974). Este índice busca identificar clusters compactos (con baja varianza intra-cluster) y bien separados (con alta distancia inter-cluster), definiéndose como la razón entre la mínima distancia entre clusters diferentes y la máxima distancia dentro de un mismo cluster; un valor más alto indica una mejor calidad de clustering, ya que refleja grupos densos y distantes entre sí, siendo útil para comparar diferentes números de clusters o algoritmos en conjuntos de datos no etiquetados (Luna-Romera, et al. 2016).

Métodos Visuales:

Dendrogramas: En el caso de clustering jerárquico, los dendrogramas muestran la estructura jerárquica de los clústeres y permiten visualizar las relaciones entre ellos, facilitando la identificación de cortes naturales en el árbol de clústeres.

Gráficos de Dispersión: Permiten visualizar la distribución de los objetos en el espacio de características y evaluar la separación entre los clústeres, especialmente cuando se trabaja con un número reducido de dimensiones.

Métodos de validación externa:

Índice Rand Ajustado (ARI): Mide similitud entre particiones ajustada por azar, con valores de -1 a 1.

Información Mutua Normalizada (NMI): Evalúa información compartida entre clústeres y etiquetas, normalizada entre 0 y 1.

Elección del método de validación:

La elección del método de validación depende del tipo de datos, el algoritmo de clustering utilizado y los objetivos del análisis. En algunos casos, puede ser útil combinar diferentes métodos de validación para obtener una evaluación más completa de la calidad de los clústeres.

Importancia de la validación:

La validación de clústeres es un paso crucial en el análisis multivariado porque ayuda a:

Asegurar la fiabilidad de los resultados:

Permite identificar si los clústeres formados son robustos y replicables.

Mejorar la interpretación de los resultados:

Ayuda a comprender la estructura de los datos y a identificar patrones significativos.

Seleccionar el mejor algoritmo de clustering:

Permite comparar diferentes algoritmos y elegir el que produce mejores resultados para los datos específicos.



2.13 Estudios de Caso

El estudio de investigación realizado por Navia et al. (2019) acerca de la caracterización de sistemas agroforestales tradicionales en el Pacífico sur de Colombia, específicamente en el departamento de Nariño, documenta que el arreglo agroforestal más generalizado en la cuenca del río Mejicano corresponde a un sistema silvoagrícola. Este sistema está conformado por asociaciones de cacao (*Theobroma cacao*), plátano (*Musa sapientum*), frutales y especies maderables. Entre las especies forestales, el cedro (*Cedrela odorata*) destaca como la más importante dentro del sistema, mientras que, entre los frutales, los cítricos –especialmente naranja y limón son los de mayor frecuencia–. Esta combinación de especies no solo diversifica la producción y mejora la estructura agroecológica del sistema, sino que aporta cualidades especiales de aroma y sabor al cacao, potenciando su valor en mercados diferenciados.

Por su parte, Espinosa et al. (2015), en su caracterización de sistemas agroecológicos para el establecimiento de cacao en comunidades afrodescendientes de Tumaco, resaltan el elevado potencial de variabilidad genética existente en los cacaos regionales. Este patrimonio genético representa una oportunidad estratégica para desarrollar sistemas productivos alternativos basados en criterios de conservación, multiplicación y diferenciación de productos de alto valor agregado, como los cacaos especiales por sabor y aroma. Desde esta perspectiva, el ambiente es concebido como una red compleja y funcional, cuya gestión racional podría posicionar Tumaco en mercados especializados, al articular sostenibilidad ambiental y competitividad económica.

Preciado et al. (2011), en su estudio de caracterización de sistemas tradicionales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la zona productiva del municipio de Tumaco, identificaron arreglos espaciales y temporales altamente diversos. Estos sistemas agroforestales se conforman principalmente por asociaciones de cacao con diferentes especies de musáceas, frutales y árboles maderables, puesto que configura una matriz productiva que favorece la biodiversidad, la resiliencia ecológica y la estabilidad de los

ingresos familiares. La diversidad estructural observada refleja un conocimiento profundo de las dinámicas ambientales locales y un manejo tradicional que integra producción y conservación.

Por su parte, Angulo (2012), en su caracterización de los sistemas productivos de la cuenca del río Rosario en Tumaco, describe sistemas multifuncionales que combinan cultivos de subsistencia y autoconsumo –como cacao, yuca (*Manihot esculenta*), maíz (*Zea mays*), plátano (*Musa paradisiaca*) y frutales con cultivos agroindustriales como la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) y el cocotero (*Cocos nucifera*)–, así como con recursos forestales (bosques de colinas y guandales) y actividades pesqueras (costeras y de estero). Incluso, en menor escala, se incorpora un componente pecuario (aves, porcinos y bovinos). Esta diversidad productiva revela una estrategia adaptativa compleja, en la cual la articulación entre diferentes actividades económicas permite amortiguar riesgos ambientales y de mercado, aunque también plantea retos significativos en términos de manejo sostenible y planificación territorial.

Montoya et al. (2015), en su estudio referido a las oportunidades para la actividad cacaotera en el municipio de Tumaco, Nariño, resaltan que una de las acciones más urgentes y que depende directamente de los productores es el desarrollo e implementación de modelos agroforestales orientados a mejorar e incrementar los niveles de producción de cacao. Estrategia que, además de potenciar los rendimientos, permitiría fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos frente a las condiciones ambientales cambiantes y abriría nuevas oportunidades en mercados de cacao sostenible y diferenciado.

Por otro lado, estudios realizados en el departamento de Santander, como los de Angulo (2000) y Pabón et al. (2016), permiten entender la situación de otros territorios cacaoteros en Colombia. Según Angulo (2000), el cultivo de cacao en Santander se caracteriza por una amplia tradición campesina, donde predominan pequeños y medianos productores con escasos recursos, particularmente en términos de capital e infraestructura productiva. Complementariamente, Pabón et al. (2016) destacan que



factores como la edad avanzada de los agricultores y los bajos niveles de escolaridad limitan la adopción de nuevas tecnologías en el cultivo. Estos hallazgos evidencian que, aunque los contextos regionales varían, existen retos estructurales comunes que deben ser abordados para lograr una transición hacia sistemas cacaoteros más sostenibles, competitivos y socialmente inclusivos.

Tuesta (2017), en su caracterización de los sistemas de producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la provincia de Alto Amazonas, identificó diversos factores que afectan el desarrollo social, tecnológico y ambiental de los sistemas cacaoteros. En el aspecto social, la falta de empoderamiento de los productores, su escaso involucramiento en procesos de transformación territorial y las deficiencias en la infraestructura vial limitan las oportunidades de desarrollo. En el ámbito tecnológico, se destacan como limitantes la ausencia de asistencia técnica especializada y la baja capacitación en manejo agronómico y poscosecha. Desde el enfoque ambiental, el estudio resalta la necesidad de reducir el uso de agroquímicos, promover un manejo más racional del recurso hídrico y fomentar prácticas agroecológicas de conservación del suelo.

En línea con esta perspectiva integral, Arboleda et al. (2010), en su análisis socioeconómico del sector cacaotero en Envigado, Colombia, destacan que el cultivo de cacao tiene un impacto económico, social y ambiental altamente significativo. El cacao, en este contexto, constituye un producto de economía campesina que demanda gran cantidad de mano de obra local, hecho que favorece el rol estratégico como sustituto de cultivos ilícitos en procesos de transición hacia economías legales y sostenibles. Asimismo, se resalta que, al formar parte de sistemas agroforestales, el cultivo de cacao contribuye activamente a la conservación del suelo, la biodiversidad y el medio ambiente, consolidándose como un pilar para el desarrollo rural sostenible.

Ramírez et al. (2014), en su investigación de la caracterización de los sistemas de producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el departamento de Norte de Santander y la evaluación de su sostenibilidad, concluyen

que existe un único sistema productivo predominante: el sistema familiar-mercantil de baja tecnología. Este sistema se caracteriza por bajos niveles de tecnificación, ingresos reducidos para la mayoría de los productores, y la insatisfacción generalizada de necesidades básicas como salud, educación y acceso a servicios públicos.

El estudio también advierte que los recursos naturales fundamentales particularmente el suelo y el agua muestran evidentes signos de degradación, comprometiendo la viabilidad futura de las unidades productivas. En general, se identifica una tendencia clara hacia la insostenibilidad del sistema, lo que evidencia la necesidad urgente de implementar acciones integrales que contemplen mejoras en el acceso a tecnología apropiada, fortalecimiento del tejido social rural, recuperación de servicios ecosistémicos y construcción de alternativas económicas inclusivas. Realidad que no es exclusiva de Norte de Santander, en tanto se evidencia por las diversas regiones cacaoteras del país, incluyendo Tumaco, donde se requieren enfoques sistémicos para transformar la actividad cacaotera en un motor real de desarrollo rural sostenible.

Escobar et al. (1990), en su estudio sobre conceptos y metodología para la tipificación de sistemas de finca, basado en la experiencia de Rimisp en la tipificación de sistemas de producción agrícola en Santiago de Chile, destacan que cualquier proceso de tipificación y clasificación de fincas requiere un análisis riguroso sobre su validez y confiabilidad. Lograr una tipificación que sea simple, robusta y operativa implica seleccionar adecuadamente las variables y métodos de análisis, pero también considerar de manera explícita el entorno socioeconómico en el cual se desarrollan los sistemas de producción.

Este enfoque reconoce que los sistemas agrícolas no existen de manera aislada, sino que son configuraciones dinámicas moldeadas por factores económicos, sociales, institucionales y culturales propios de cada región. Así, la validez de una tipificación depende tanto de la consistencia interna de los grupos formados como de su coherencia con las condiciones estructurales del territorio. Aplicar esta perspectiva en la tipificación de



sistemas agroforestales de cacao en regiones como Tumaco permite construir clasificaciones pertinentes, contextualizadas y útiles para diseñar estrategias de desarrollo rural diferenciadas y sostenibles.

Hidalgo et al. (2014), en su investigación de tipificación de fincas cacaoteras en la subcuenca media del río Huayabamba, distrito de Huicungo, en el departamento de San Martín (Perú), identificaron tres tipos de sistemas productivos significativamente diferenciados entre sí. El Grupo I corresponde a fincas que desarrollan actividades económicas paralelas al cultivo del cacao, mediante un sistema de producción convencional con plantaciones policlonales. El Grupo II concentra fincas dedicadas principalmente a la producción orgánica, en las cuales predominan plantaciones híbridas asociadas con el clon CCN-51, y el Grupo III comprende fincas que manejan plantaciones monoclonales, que utilizan exclusivamente el clon CCN-51.

Estos resultados demuestran la diversidad estratégica que puede existir dentro de un mismo territorio cacaotero, donde las decisiones del tipo de material genético utilizado, el sistema de manejo y la orientación productiva (convencional, orgánica o especializada) responden tanto a factores de mercado como a condiciones socioeconómicas locales. Este enfoque de tipificación facilita la identificación de grupos homogéneos de productores y permite diseñar políticas y programas de intervención diferenciados, más adecuados a las necesidades y potencialidades de cada tipo de finca.

García et al. (2014), en su análisis de la situación socioeconómica de las organizaciones campesinas del cantón Quinsaloma, Ecuador, en relación con el cultivo de cacao, identificaron que los sistemas de producción utilizados son mayoritariamente tradicionales y semitecnificados. El 93 % de la tierra cultivable es de propiedad de los mismos productores, lo que otorga una relativa estabilidad en el acceso al recurso tierra. Sin embargo, el principal factor identificado como limitante para mejorar el desempeño productivo de las huertas cacaoteras es la falta de asistencia técnica adecuada. Igual, se señala que el cacao se comercializa principalmente en estado semiseco, lo cual restringe el acceso a mercados de mayor valor agregado.

De manera complementaria, Anzules (2019), en su investigación de la sustentabilidad de sistemas de producción de cacao en Santo Domingo de los Tsáchilas (Ecuador), concluye que las fincas cacaoteras presentan una alta diversificación productiva, aunque la producción de cacao sigue siendo la actividad económica más importante. Los resultados de este estudio muestran la necesidad urgente de mejorar el manejo técnico del cultivo de cacao y de fortalecer el acceso a servicios básicos en las fincas, como infraestructura, agua y vías de comunicación. Estas experiencias reflejan que, incluso en territorios con fuerte vocación cacaotera, las limitaciones en asistencia técnica y servicios rurales continúan siendo barreras estructurales para alcanzar sistemas de producción verdaderamente sostenibles y competitivos.



3. Metodología

3.1 Localización y Descripción del Área de Estudio

La investigación se desarrolló en el municipio de Tumaco, ubicado en el departamento de Nariño, Colombia, entre las coordenadas geográficas 01°47' de latitud norte y 78°47' de longitud oeste. Esta región pertenece a las zonas de vida bosque húmedo tropical (bh-T) y bosque muy húmedo tropical (bmh-T), según la clasificación ecológica de zonas de vida propuesta por Holdridge (1967).

El territorio de Tumaco presenta una altitud variable que va desde el nivel del mar hasta aproximadamente 500 metros sobre el nivel del mar, con una precipitación promedio anual de 3.067 mm, una temperatura media de 25.5 °C, una humedad relativa del 88 %, una evapotranspiración potencial de 1.023 mm/año, un promedio de brillo solar de 1.008 horas anuales y una radiación solar estimada en 15.080 J/cm² (IDEAM, 2019). Estas condiciones ambientales configuran un entorno propicio para el desarrollo de sistemas agroforestales de cacao, lo cual favorece la diversidad biológica y brinda oportunidades para la implementación de estrategias de producción sostenible adaptadas a climas tropicales húmedos.

Se estudiaron 16 veredas localizadas en consejos comunitarios y en zonas adyacentes a la carretera principal del municipio (Figura 2). Estas veredas se caracterizan por el manejo tradicional de sistemas de producción de cacao, combinados con una alta diversidad productiva que incluye especies agrícolas, forestales y frutales. Asimismo, las comunidades rurales de esas zonas mantienen abundantes manifestaciones sociales y culturales, expresadas en prácticas colectivas, formas tradicionales de organización y saberes agroecológicos locales.

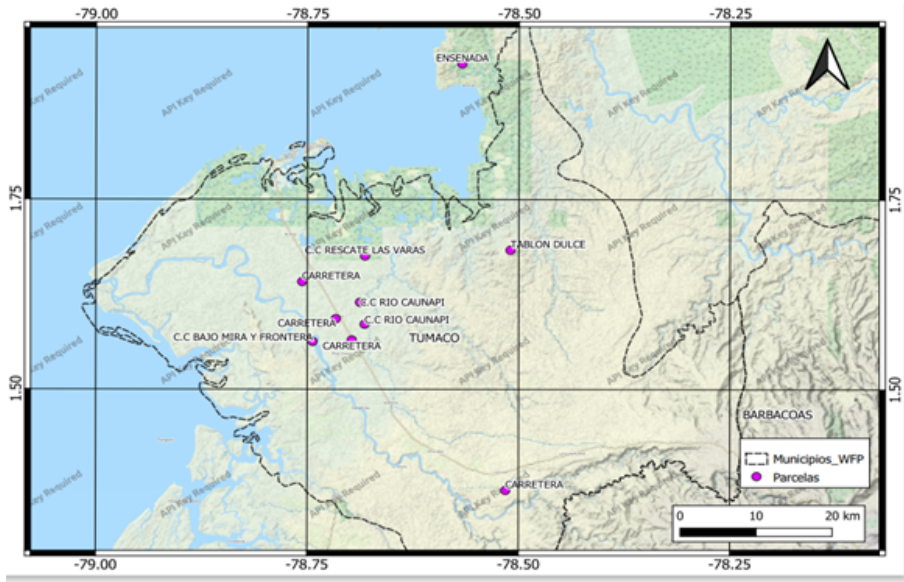


Figura 2. Localización de las zonas de muestreo en el municipio de Tumaco, Nariño.

Fuente: Investigación

La selección de esas áreas respondió a criterios de representatividad territorial, diversidad de condiciones agroecológicas y dinamismo sociocultural, factores que configuran el contexto en el cual se desarrolla la actividad cacaotera en Tumaco y que resultan determinantes para comprender los retos y oportunidades del fortalecimiento de sistemas agroforestales tradicionales.

3.2 Descripción de las Zonas de Estudio

La Tabla 1 presenta la distribución de las zonas de estudio seleccionadas para el desarrollo de la investigación en el municipio de Tumaco, Nariño. Se delimitaron 16 veredas agrupadas en dos grandes categorías: veredas pertenecientes a consejos comunitarios afrodescendientes y veredas localizadas en áreas cercanas a la carretera principal. Esta selección estratégica permitió abarcar tanto territorios con fuerte identidad cultural y organización comunitaria como zonas con mayor acceso a mercados



y servicios, de manera que incluya la diversidad socioeconómica y productiva de los sistemas cacaoteros tradicionales de la región.

Tabla 1. Consejos comunitarios y veredas como zonas para la investigación en el municipio de Tumaco, Nariño

| No. | Consejos comunitarios | Veredas | No. | No consejo comunitario | Veredas |
|-----|-----------------------|-----------------|-----|------------------------|---------------------|
| 1 | Río Caunapi | Alto Villa Rica | 9 | Carretera | Chilvi |
| 2 | | El descanso | 10 | Carretera | Cajapi |
| 3 | Río Chagui | Pacora | 11 | Carretera | Juan Domingo |
| 4 | Bajo Mira y Frontera | Peña Colorada | 12 | Carretera | Inguapi del Guadual |
| 5 | La Nupa | La Nupa | 13 | Carretera | Km 35 |
| 6 | Rescate las Varas | San Luis Robles | 14 | Carretera | Km 36 |
| 7 | Acapa - Ensenada | Bocas de Curay | 15 | Carretera | EsPRIella |
| 8 | Tablón Dulce | Tablón Dulce | 16 | Carretera | Pulgande km 53 |

Fuente: Investigación.

3.3 Flujograma Metodológico de la Investigación

La investigación se estructuró siguiendo las metodologías propuestas por Valerio et al. (2004) y Ordóñez (2018), adaptadas a las condiciones específicas del municipio de Tumaco, Nariño. El proceso metodológico se sintetiza en la Figura 3, la cual representa de manera esquemática las fases, procedimientos y técnicas aplicadas para la caracterización y tipificación de los sistemas de producción cacaotera tradicionales.

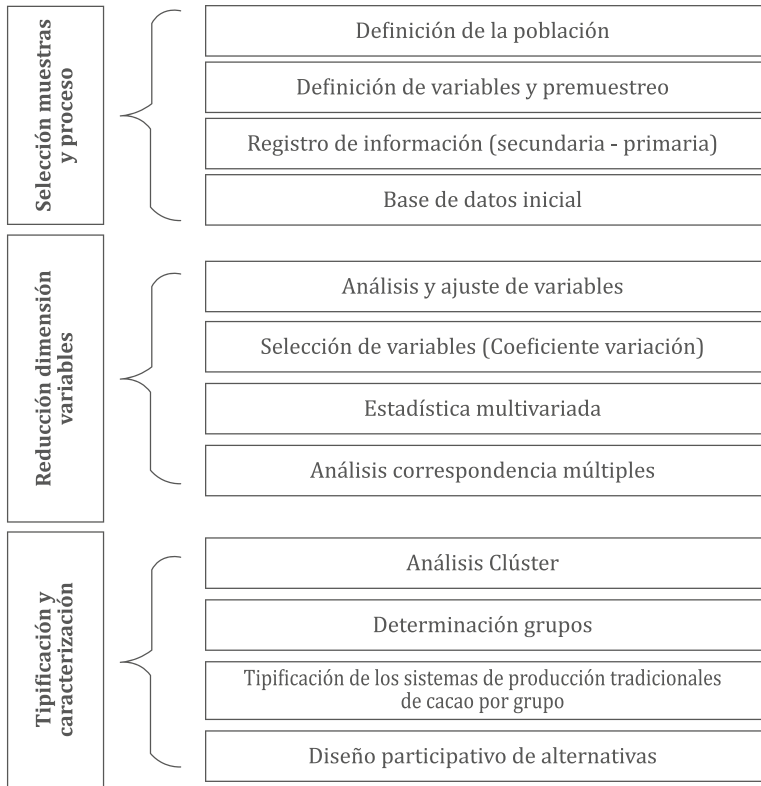


Figura 3. Flujograma metodológico de la investigación para la tipificación de fincas cacaoteras en el municipio de Tumaco, Nariño

3.4 Población

La investigación consideró como población objetivo a los productores de cacao del municipio de Tumaco, en el departamento de Nariño. De acuerdo con la información consignada en el documento “Diagnóstico, Política y Estrategias para el Desarrollo Agropecuario del Departamento de Nariño” (CONPES 3811, Gobernación de Nariño, 2014), la población cacaotera de Tumaco se estima en aproximadamente 8.000 productores. Esta cifra constituye el universo de referencia para el diseño metodológico del estudio y la selección de las unidades de análisis en las zonas de intervención delimitadas.



3.5 Variables evaluadas

La investigación definió un conjunto de 32 variables de caracterización, agrupadas en tres dimensiones fundamentales: ambiental, económica y social. Estas variables fueron seleccionadas de acuerdo con los objetivos de tipificación de sistemas de producción cacaotera, y considerando la relevancia teórica y práctica en el contexto rural de Tumaco. Cada variable fue codificada y clasificada en modalidades específicas, a fin de facilitar su procesamiento estadístico y el posterior análisis multivariado (Anexo 1).

En el Anexo 1 se sintetizan las variables evaluadas, sus respectivos códigos de identificación y las categorías de respuesta establecidas, lo que permite capturar la heterogeneidad estructural, productiva y socioeconómica de las fincas objeto de estudio.

3.6 Diseño del muestreo

Se aplicó un muestreo aleatorio estratificado en una población de aproximadamente 8.000 productores de cacao en el municipio de Tumaco. La variable de estratificación seleccionada fue la edad de los productores, con base en la cual se construyeron cuatro estratos etarios diferenciados. La unidad de análisis correspondió al productor de cacao.

Con el propósito de determinar la variable de mayor variabilidad dentro de cada estrato, se desarrolló un premuestreo equivalente al 0.5 % de la población (400 agricultores). El análisis de los datos recolectados identificó que la producción de cacao seco, con un rango de variación entre 100 y 1.600 kg ha⁻¹ año⁻¹, presentaba la mayor dispersión estadística, con una varianza general de 80.0002 y una desviación estándar de 282,84 kg/ha/año.

La distribución de las varianzas específicas para cada estrato etario se presenta en la Tabla 3, la cual orientó la determinación del tamaño de muestra requerido para garantizar representatividad estadística en el análisis posterior.

Tabla 2. Distribución de los estratos de acuerdo y la varianza encontrada

| Número | Estratos (años) | Varianza |
|--------|-----------------|------------------------|
| 1 | <18 | 80.000 ² |
| 2 | 19-50 | 77.337,95 ² |
| 3 | 51-65 | 76.424,26 ² |
| 4 | >65 | 74.926,55 ² |

Fuente: Investigación

La tabla muestra la distribución de las varianzas de la producción de cacao seco por estrato de edad de los productores, para evidenciar diferencias en la variabilidad interna de cada grupo. Esta información fue utilizada para definir el tamaño muestral óptimo por estrato, que permita asegurar la adecuada representatividad de la población total en el análisis de tipificación.

3.7 Tamaño de la muestra

Para determinar el tamaño de la muestra estratificada se utilizó la fórmula propuesta por Castillo (2002) (Ecuación 1). La asignación de unidades muestrales a cada estrato se realizó mediante asignación proporcional, al considerar la importancia relativa de cada estrato y su varianza específica. Se estableció un error máximo permisible del 5 % y un nivel de confianza estadística del 95 %.

La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$n \geq \frac{\sum_{i=1}^L \left[\frac{U_L^2 S_i^2}{w_i} \right]}{\left[\frac{d}{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}} \right]^2 + \sum_{i=1}^L (U_L S_i^2)} \dots\dots\dots (1)$$

Donde,

n = Tamaño de la muestra común/general

N = Tamaño de las unidades de muestreo en las que está dividida la población

L = Número de estratos en que se divide la población



n_i = *Tamaño de la muestra para el i-ésimo estrato*

U_i = *Número de unidades de muestreo presentes en el i-ésimo estrato*

s_i^2 = *Varianza de la muestra aleatoria simple tomada en el i-ésimo estrato*

S_i = *Desviación estándar de la muestra aleatoria simple tomada en el i-ésimo estrato*

W_i = *Importancia del i-ésimo estrato*

$Z_{1-\alpha/2}$ = *Cuantil de la distribución normal estándar con una probabilidad menor o igual a 1- α /2*

d = *Máximo error de o alejamiento con respecto al verdadero valor (Error máximo admisible).*

El tamaño de la muestra correspondió a 1.200 productores de cacao con una varianza global de 80.000². Para la asignación de la muestra en cada estrato se utilizó la fórmula 2.

$$n_i = n * \frac{N_i}{N} \dots\dots\dots (2)$$

N = *Número de elementos de la población*

n = *El tamaño de la muestra general*

N_i = *estimación del tamaño del estrato.*

La muestra aleatoria para cada uno de los estratos fue distribuida teniendo en cuenta la importancia o peso de este (tabla 3).

Tabla 3. Distribución de la muestra en los diferentes estratos

| Número | Estratos | Importancia (wi %) | Muestra (U _i) |
|--------|----------|--------------------|---------------------------|
| 1 | <18 | 10 | 2 |
| 2 | 19-50 | 50 | 641 |
| 3 | 51-65 | 30 | 401 |
| 4 | >65 | 10 | 156 |

Fuente: Investigación

La tabla 4 contiene la distribución de la muestra entre los diferentes estratos de edad, al considerar su importancia relativa en la población total.

El estrato de 19 a 50 años representa el mayor peso muestral, en cuanto refleja la concentración demográfica en los productores jóvenes y adultos activos. Esta asignación proporcional garantiza la representatividad estadística de cada subgrupo en los análisis posteriores.

3.8 Procesamiento y Análisis de Datos

Una vez concluida la fase de recolección de información en campo, mediante la aplicación de encuestas semiestructuradas, se procedió al procesamiento de los datos utilizando el *software Microsoft Excel*. Los datos de todas las variables evaluadas fueron organizados en una matriz única, en la cual cada variable fue codificada de acuerdo con sus respectivas modalidades previamente definidas.

Enseguida se aplicó un procedimiento de depuración basado en el coeficiente de variación (CV) de las variables. De acuerdo con el criterio metodológico propuesto por Valerio et al. (2004), aquellas variables que presentaron un coeficiente de variación inferior al 30 % fueron descartadas del análisis, por considerarse que no ofrecían un nivel de discriminación estadística adecuado para efectos de la tipificación. Esta etapa de preanálisis garantizó que las variables incluidas en los procedimientos multivariados posteriores aportaran suficiente variabilidad y poder explicativo en la diferenciación de los sistemas de producción estudiados.

3.8.1 Variables con Bajo Valor Discriminante

Durante el proceso de depuración de la matriz de datos, se identificaron y eliminaron del análisis aquellas variables que presentaron un bajo poder discriminativo, de acuerdo con el criterio establecido del coeficiente de variación inferior al 30 %. Las variables excluidas fueron: la tenencia de la tierra en modalidad arrendada o de otro tipo; los costos de producción superiores a siete millones de pesos por hectárea; la periodicidad del control fitosanitario realizada cada ocho o quince días; la asistencia técnica recibida a través de Fedecacao y la Alcaldía de Tumaco; y las actividades desarrolladas diferentes a las relacionadas con la finca.



La eliminación de estas variables permitió concentrar el análisis multivariado en aquellas variables que aportan mayor variabilidad explicativa, para así optimizar la robustez de la tipificación de los sistemas productivos de cacao en el área de estudio.

3.8.2 Análisis de Correspondencias Múltiples

Para el análisis de la estructura subyacente en los datos categóricos y la identificación de asociaciones entre las variables evaluadas, se aplicó un Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM). Esta técnica es especialmente adecuada en contextos que dispongan de un elevado número de individuos y de variables cualitativas, como es el caso del presente estudio.

Con el objetivo de obtener resultados estadísticamente consistentes y optimizados, se utilizó el método de estimación por máxima verosimilitud, que permite emplear como medida de proximidad la distancia euclídea, siguiendo las recomendaciones metodológicas propuestas por Hair (1999). Esta estrategia posibilitó sintetizar la información multivariada en un espacio de dimensiones reducidas, hecho que facilita la interpretación gráfica de las relaciones entre las modalidades de las variables y la identificación de agrupamientos naturales entre los sistemas de producción de cacao analizados.

3.8.3 Análisis Clúster

Con posterioridad al Análisis de Correspondencias Múltiples se realizó un análisis de clúster jerárquico, con el propósito de agrupar los sistemas de producción de cacao en Tumaco en grupos homogéneos de acuerdo con sus características productivas. Para este procedimiento se empleó el método de Ward (Ward, 1963; Gower, 1967) como criterio de enlace, dado que minimiza el incremento de la varianza intraclúster en cada etapa de la fusión de conglomerados.

El método de Ward tiene como principio fundamental la fusión, en cada paso del algoritmo, de aquellos grupos cuya combinación produce el menor aumento posible en la variabilidad interna, logrando así conglomerados

más compactos y homogéneos (Hair et al., 1999). Esta propiedad asegura una clasificación más consistente y facilita la interpretación de los grupos formados, al reducir la heterogeneidad dentro de cada clúster.

La aplicación de esta metodología facilitó identificar tres clústeres principales, utilizando el rendimiento del cacao (producción de cacao seco por unidad de área) como variable central de asociación. El rendimiento se adoptó como criterio clave, debido a que constituye un indicador directo de la productividad y competitividad de los sistemas de producción. En efecto, un mayor nivel de rendimiento refleja un uso más eficiente de los recursos disponibles, mientras que rendimientos bajos pueden ser indicativos de deficiencias en prácticas agronómicas, manejo tecnológico o condiciones ambientales adversas.

Se utilizó en el programa de R Studio, el paquete cluster para distancia Gower (adecuada para categóricos), pam para clustering (k-medoids, común para datos cualitativos), y fpc para la validación de los clústeres. Los métodos utilizados fueron: Índice de Silhouette (máximo para buena cohesión/separación), Davies-Bouldin (mínimo para clústeres compactos y separados) y Dunn (máximo para separación relativa).

Tabla 4. Métodos de validación de los clústeres

| k | Silhouette | Davies-Bouldin | Dunn |
|---|------------|----------------|-------|
| 2 | 0.359 | 1.248 | 0.577 |
| 3 | 0.497 | 1.050 | 0.577 |
| 4 | 0.523 | 1.322 | 0.577 |
| 5 | 0.550 | 1.178 | 0.577 |

Fuente: Este estudio

El índice de Silhouette aumenta con k, indicando mayor cohesión interna, pero alcanza un valor razonable (0.497) en k=3, sugiriendo clústeres bien definidos sin sobresegmentación. El Davies-Bouldin es mínimo en k=3 (1.050), confirmando mejor equilibrio entre compactación y separación. El Dunn permanece constante (0.577), posiblemente por la estructura discreta de los datos categóricos, donde las distancias mínimas



inter-clúster y máximas intra-clúster no varían mucho. En general, $k=3$ es el óptimo, alineándose con la simulación de 3 grupos, validando la estructura subyacente de los datos cualitativos.

De esa manera, los tres clústeres obtenidos permiten distinguir categorías de sistemas de producción tradicional de cacao en Tumaco en función de su desempeño productivo (alto, medio o bajo rendimiento), y aporta una base empírica sólida para el diseño de estrategias de mejora diferenciadas y para la promoción de modelos de producción más sostenibles y competitivos en la región.

3.8.4 Tipificación de las Fincas

Con base en la información derivada del análisis de clústeres ya realizado, se identificaron diferentes agrupaciones de fincas cacaoteras en Tumaco. Cada agrupación o clúster reúne fincas con características productivas similares, particularmente en términos de rendimiento. A partir de estas agrupaciones, se establecieron rangos específicos de producción de cacao seco para cada grupo, determinándose así tipologías de fincas que toman el rendimiento como variable central de clasificación. En este contexto, el nivel de productividad de cacao seco (medido en kg/ha/año) fue el eje diferenciador para definir los tipos de fincas identificadas.

La amplia variación en productividad entre las fincas justifica este enfoque de tipificación. De acuerdo con estudios previos, los sistemas tradicionales de cacao en Tumaco presentan rendimientos promedio bajos, cercanos a 275 kg/ha/año, cerca del 50 % del promedio nacional registrado en el periodo de análisis. En contraste, investigaciones en la adopción de prácticas mejoradas y sistemas agroforestales tecnificados reportan que la productividad podría alcanzar hasta 1,8 toneladas/ha/año en condiciones óptimas. Diferencias sustanciales de producción que se reflejaron claramente en los clústeres identificados: cada grupo correspondió a un rango de rendimiento distinto, desde fincas de baja productividad hasta aquellas de alta productividad; en el medio quedó una categoría de rendimiento intermedio. Así, el rendimiento del cacao seco operó como criterio central para distinguir las tipologías de finca.

La tipificación obtenida permite caracterizar de manera diferenciada los sistemas de producción de cacao en Tumaco, lo cual resulta esencial para orientar estrategias de fortalecimiento rural. Contar con tipologías definidas proporciona modelos de referencia para investigadores, extensionistas y formuladores de políticas, y facilita la comprensión de la diversidad de realidades productivas. En efecto, las tipologías de fincas constituyen una base técnica para diseñar estrategias adaptadas a las necesidades específicas de cada grupo, debido a que promueven de forma simultánea la sostenibilidad y la competitividad del sector. Por ejemplo, las fincas de baja productividad podrían beneficiarse de estrategias centradas en asistencia técnica, renovación de cultivos y adopción de buenas prácticas agrícolas. A su vez, las fincas de alta productividad ofrecen un potencial de consolidación a través de la diferenciación del producto, certificaciones de calidad y acceso a mercados especializados.

En síntesis, la tipificación basada en los rangos de rendimiento identificados mediante análisis de clúster constituye una herramienta poderosa para diferenciar los sistemas tradicionales de producción de cacao en Tumaco. Esta diferenciación enriquece el conocimiento académico de las dinámicas rurales locales y proporciona instrumentos prácticos para la toma de decisiones. Focalizar los esfuerzos de desarrollo rural, asistencia técnica e inversión pública o privada en función del tipo de finca identificado permitirá trazar caminos concretos hacia una mayor sostenibilidad económica, social y ambiental, al tiempo que contribuirá a elevar la competitividad del sector cacaotero en el contexto regional y nacional.

3.8.5 Diseño Participativo de Alternativas

La planificación de las alternativas de manejo adaptadas a las realidades locales requirió una previa definición de las variables de mayor peso estadístico en el análisis de tipificación, debido a que estas sirven como base para el diseño de estrategias de intervención. Después se realizaron diálogos participativos con productores y técnicos locales para analizar los principales problemas productivos identificados y explorar conjuntamente posibles soluciones prácticas.



En desarrollo del enfoque metodológico se desarrollaron talleres participativos en cada una de las zonas de estudio. En esos talleres se socializaron los resultados de la investigación, en particular los tipos de sistemas de producción caracterizados, y se promovió un espacio de reflexión y concertación con los productores. El propósito fue explorar, consensuar y precisar alternativas de manejo sostenible que permitieran fortalecer los sistemas tradicionales de cacao, tendientes a mejorar su productividad, sostenibilidad y competitividad en la región.

En los talleres se aplicó la metodología de caracterización participativa de sistemas agroforestales propuesta por el CONIF (2004), la cual incluye el reconocimiento general de la zona de influencia y de predios aledaños, desde la perspectiva del investigador, con el fin de enriquecer la información observada en campo. El análisis participativo abordó aspectos tecnológicos, ecológicos, económicos y sociales de los sistemas existentes; el evento finalizó con la identificación y diseño colectivo de soluciones viables y adaptadas a las condiciones locales. Dicho enfoque metodológico permitió integrar de manera efectiva el conocimiento científico con el saber local, al generar propuestas de mejora, basadas en la experiencia de los productores, lo cual fortalece la apropiación comunitaria de las alternativas de manejo y contribuye a la sostenibilidad de los sistemas de producción de cacao en Tumaco.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 *Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM)*

Para el análisis de los sistemas de producción tradicionales de cacao en Tumaco se analizaron 32 variables categóricas, las cuales totalizaron 102 modalidades distintas. Estas variables abordaron aspectos socioeconómicos, agronómicos y organizativos de los productores. Como parte del proceso de validación de los datos se eliminaron 10 modalidades correspondientes a diferentes variables, aplicando como criterio de exclusión un coeficiente de variación inferior al 30 %. Esta etapa de depuración garantizó que las variables restantes presentaran un nivel adecuado de dispersión, maximizando su capacidad para identificar patrones significativos de diferenciación entre los sistemas estudiados.

El Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM) permitió sintetizar la variabilidad estructural de los datos en componentes factoriales. Los primeros cinco componentes del ACM explicaron conjuntamente el 29.59 % de la variabilidad total, mientras que los primeros 18 componentes acumularon el 59.75 % de la variabilidad observada (ver Tabla 4). Aunque estos porcentajes pueden parecer bajos en comparación con análisis factoriales tradicionales sobre datos métricos, son consistentes con estudios que aplican ACM sobre bases de datos categóricas complejas (Husson, Josse, & Pagès, 2017). La dispersión relativamente elevada de la variabilidad entre múltiples dimensiones es característica de estructuras sociales y productivas en las que intervienen numerosos factores interrelacionados, como ocurre en los sistemas tradicionales de cacao manejados por comunidades rurales.

**Tabla 5.** Porcentaje de la varianza explicada por cada uno de los componentes principales derivados del ACM:

| Componentes | Valor propio | Varianza (%) | Varianza acumulada |
|-------------|--------------|--------------|--------------------|
| 1 | 0.20 | 8.44 | 8.44 |
| 2 | 0.15 | 6.55 | 14.99 |
| 3 | 0.14 | 5.99 | 20.98 |
| 4 | 0.11 | 4.67 | 25.65 |
| 5 | 0.09 | 3.94 | 29.59 |

Fuente: Investigación

Los resultados sugieren la existencia de una estructura interna compleja y multifactorial en los sistemas de producción de Tumaco, en donde las prácticas agrícolas, las condiciones socioeconómicas y los factores organizativos interactúan de manera simultánea para configurar distintos modelos productivos. Esta complejidad justifica la necesidad de utilizar herramientas multivariadas como el ACM y refuerza la pertinencia del enfoque de tipificación empleado en esta investigación.

En orden de importancia, las variables que realizaron las mayores contribuciones a la formación de los componentes principales, teniendo en cuenta su valor p, fueron: producción de cacao seco, especies de sombrero, organización comunitaria, tipo de mano de obra disponible y registro de actividades y costos (ver Tabla 5).

Tabla 6. Variables con mayor contribución a la inercia de los componentes

| No. | Variable | Descripción | P. valor |
|-----|----------|--------------------------|-----------|
| 1 | PCS | Producción de cacao seco | 1.75e-190 |
| 2 | ESPS | Especies de sombrero | 2.75e-166 |
| 3 | ORGC | Organización comunitaria | 5.37e-119 |
| 4 | MNO | Mano de obra | 2.12e-109 |
| 5 | RAC | Registro de actividades | 5.02e-66 |
| 6 | USE | Uso de las especies | 1.8e-41 |
| 7 | DIST | Distancia a la finca | 3.88e-33 |

| | | | |
|----|------|--|----------|
| 8 | VGCS | Venta del grano de cacao seco | 6.92e-24 |
| 9 | CFAM | Composición familiar | 1.65e-18 |
| 10 | CM | Control de malezas | 8.55e-17 |
| 11 | TFI | Topografía de la finca | 7.72e-16 |
| 12 | ACP | Tipo de poda aplicada | 4.31e-14 |
| 13 | PCFS | Periodicidad del control fitosanitario | 1.74e-12 |
| 14 | ADAF | Actividades diferentes a las de la finca | 3.73e-11 |
| 15 | AF | Área de la finca | 1.61e-9 |
| 16 | DS | Densidad de siembra | 2.11e-9 |
| 17 | ECC | Edad de los cultivos de cacao | 3.87e-8 |
| 18 | VARC | Variedades de cacao | 0.000099 |

Fuente: Investigación

Las variables que contribuyen en el componente uno (1) son: Registro de actividades y de costos (9.77), Mano de obra (9.09), Especies de sombrero (8.70), Organización comunitaria (5.12), Composición familiar (3.84).

Para el componente dos (2): Actividades diferentes a las de la finca (22.71), Registro de actividades y de costo (17.65), Densidad de siembra (17.42), Variedades cacao (2.81), Venta del grano de cacao seco (2.14).

Componente tres (3): Periodicidad del control fitosanitario (9.52), Distancia a la finca (7.73), Actividades diferentes a las de la finca (7.53), Control de malezas (6.29), Distancia de siembra (4.69).

Componente cuatro (4) son: Densidad de siembra (6.68), Especies de sombrero (6.19), Uso de las especies (6.18), Producción de cacao seco (6.08), Actividades diferentes a las de la finca (5.36). El componente cinco (5): Edad de los cultivos (9.65), Densidad de siembra (7.83), Uso de las especies (6.37), Área de la finca (6.25), Densidad de siembra (6.01).

Estas variables permiten interpretar que las dimensiones que tienen que ver con la organización, la disponibilidad de trabajo familiar o contratado, y la diversidad del sombrero en los sistemas agroforestales son factores

fundamentales que configuran las principales diferenciaciones internas entre los sistemas de producción analizados.

La alta contribución de la variable "registro de actividades y costos" sugiere que la formalización de prácticas administrativas dentro de la finca es un diferenciador clave entre tipos de productores, mientras que la variable "especies de sombrío" refleja la diversidad de estrategias agroforestales utilizadas en la región. La variable "organización comunitaria", por su parte, destaca la importancia de la participación social en la estructura productiva, mientras que "mano de obra" y "composición familiar" revelan diferencias en el capital humano disponible para el manejo del cacao. Los resultados permiten entender la heterogeneidad estructural de las fincas de cacao en Tumaco y, a la vez, identificar posibles ejes estratégicos para la formulación de alternativas de manejo diferenciadas y adaptadas a cada tipo de productor.

El análisis de las contribuciones a las dos primeras dimensiones factoriales permitió identificar los siguientes patrones destacados:

- En la Dimensión 1 (eje a), las variables de mayor aporte fueron: especies de sombrío (ESPS), mano de obra (MNO) y organización comunitaria (ORGC). Estas variables están estrechamente asociadas con el tipo de manejo agroforestal, el capital humano disponible y el nivel de integración social de los productores, componentes fundamentales en la diferenciación de los sistemas tradicionales.
- En la Dimensión 2 (eje b), sobresalieron las variables relacionadas con: actividades diferentes a las de la finca (ADAF), tipo de poda aplicada (ACP), control de malezas (CM) y densidad de siembra (DS). Estas variables reflejan dinámicas de diversificación de ingresos, intensidad en el manejo agronómico y estrategias de organización espacial del sistema de producción.

Un aspecto relevante observado en la representación gráfica de las dimensiones (Figura 4) es que la variable registro de actividades y costos (RAC) se separa de los demás grupos de variables. Este comportamiento sugiere que la capacidad de llevar registros administrativos formales en las fincas constituye un factor diferenciador transversal, menos asociado a las prácticas productivas específicas, y más vinculado a la gestión organizativa y empresarial de los sistemas cacaoteros.

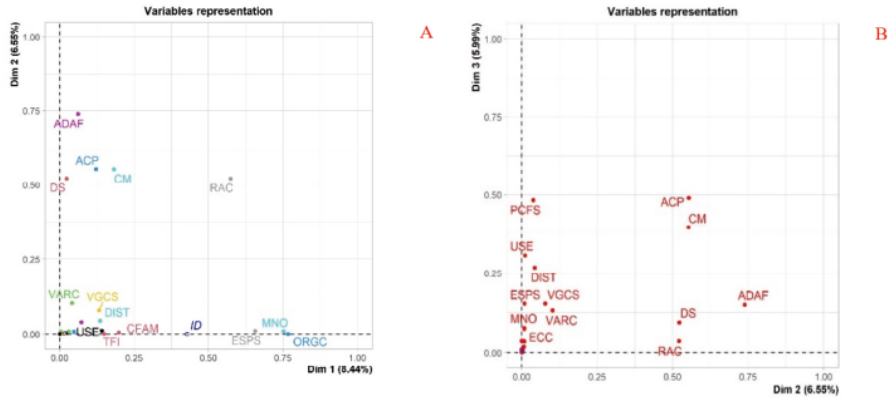


Figura 4. Contribución de las variables a los diferentes ejes:

- A) Aporte de las variables a los ejes 1 y 2;
- B) Aporte de las variables a los ejes 2 y 3.

Fuente: Investigación

Esta separación del "registro de actividades" respecto a las variables estrictamente agrícolas refuerza la hipótesis de que la formalización administrativa es un rasgo emergente en algunos productores, que podría estar asociado a mayores niveles de organización, acceso a mercados formales y estrategias de diferenciación comercial, aspectos fundamentales para la transición hacia sistemas de producción más competitivos y sostenibles.

4.2 Análisis Jerárquico de los Componentes

El análisis jerárquico de clúster, aplicado en los resultados del Análisis de Correspondencias Múltiples, permitió identificar tres agrupaciones principales como la solución más adecuada para la tipificación de los sistemas de producción de cacao en Tumaco. La producción de cacao seco (PCS) se

utilizó como variable de referencia en la construcción de los clústeres, dado su alto nivel de contribución a la variabilidad total de los datos y su reconocida importancia económica para los productores, quienes asocian directamente la cantidad de producción con la rentabilidad de sus explotaciones.

Este enfoque metodológico es consistente con investigaciones previas en sistemas agroforestales, donde la productividad ha sido validada como un indicador central en procesos de tipificación y caracterización de fincas (Somarriba et al, 2018). En el contexto de Tumaco, donde la cacaocultura representa un eje fundamental del desarrollo rural, utilizar el rendimiento como criterio principal de agrupamiento resulta pertinente.

La Figura 5 presenta el dendrograma generado por el análisis jerárquico, el cual muestra la conformación de los tres clústeres. Cada grupo representa un conjunto de fincas con patrones productivos, socioeconómicos y de manejo diferenciados, los cuales serán caracterizados en detalle en los siguientes apartados:

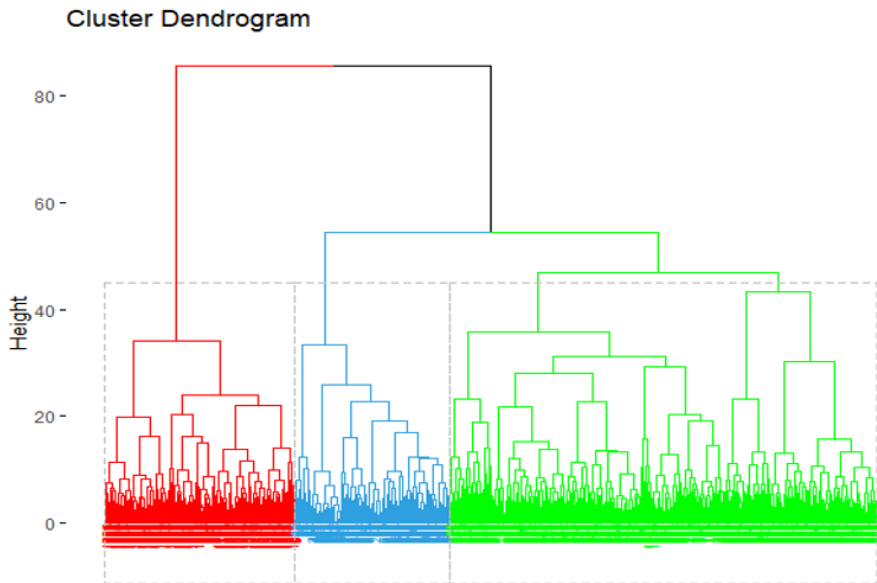


Figura 5. Agrupamiento de los sistemas tradicionales de producción de cacao en Tumaco

4.3 Descripción de las Agrupaciones de los Agricultores y sus Tipologías

Para la descripción de los clústeres y las respectivas modalidades de las variables, en la Tabla 6 se resume las modalidades de las variables que realizaron las contribuciones más significativas a la conformación de cada uno de los tres clústeres identificados mediante el análisis jerárquico. Esta información complementa el análisis de correspondencias múltiples y permite identificar de manera más precisa los factores que definen a cada agrupación de productores.

Tabla 7. Contribución significativa de las diferentes modalidades de las variables a la conformación de clústeres

| Var/Mod | Clúster 1 | Var/Mod | Clúster 2 | Var/Mod | Clúster 3 |
|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| DIST=DIST1 | 6.86 | ADAF=ADAF1 | 5.8 | CFAM=CFAM2 | 7.17 |
| DS=DS2 | 4.05 | CFAM=CFAM1 | 5.21 | DIST=DIST2 | 10.6 |
| DS=DS3 | 4.82 | DIST=DIST1 | 9.26 | DIST=DIST3 | 6.59 |
| ECC=ECC4 | 4.14 | ECC=ECC2 | 4.13 | DS=DS1 | 4.23 |
| ESPS=ESPS1 | 7.16 | ECC=ECC3 | 1.36 | ESPS=ESPS2 | 17.5 |
| MNO=MNO1 | 4.59 | ESPS=ESPS1 | 16.1 | ESPS=ESPS3 | 10.3 |
| ORGC=ORGC1 | 6.35 | MNO=MNO1 | 12.8 | MNO=MNO2 | 6.96 |
| PCS=PCS3 | 23.3 | ORGC=ORGC1 | 12.9 | MNO=MNO3 | 12.9 |
| PCS=PCS4 | 7.33 | PCS=PCS1 | 6.32 | ORGC=ORGC2 | 16.8 |
| RAC=RAC4 | 6.48 | PCS=PCS2 | 7.09 | PCS=PCS1 | 5.76 |
| TFI=TFI1 | 5.56 | RAC=RAC4 | 7.02 | RAC=RAC3 | 11.7 |
| VGCS=VGCS2 | 5.21 | TFI=TFI1 | 5.46 | TFI=TFI2 | 9.74 |
| ACP=ACP2 | 4.81 | USE=USE2 | 11.9 | USE=USE3 | 7.75 |
| CM=CM1 | 4.75 | ACP=ACP2 | 1.61 | USE=USE4 | 4.36 |
| AF=AF2 | 4.36 | PCFS=PCFS1 | 4.41 | VGCS=VGCS1 | 9.34 |
| AF=AF3 | 3.89 | - | - | ACP=ACP3 | 4.07 |

Fuente: Investigación



4.3.1 Clúster 1

El Clúster 1 agrupa al 30 % de los agricultores analizados, caracterizados por alcanzar producciones superiores a 600 kg/ha/año de cacao seco. Estos productores llevan registros formales de producción, practican un manejo técnico más adecuado y poseen fincas localizadas a menos de un kilómetro de los poblados principales, lo que facilita su acceso a servicios básicos y mercados.

En cuanto al sistema productivo, las fincas de este clúster presentan especies de sombrío conformadas principalmente por musáceas y frutales, asociados a sistemas agroforestales diversificados. Los productores de este grupo están vinculados a organizaciones comunitarias, lo que ha favorecido su acceso a mejores condiciones de comercialización. La topografía predominante en sus predios es plana o de vega, lo que disminuye riesgos asociados al volcamiento de árboles y facilita el manejo agronómico, y mantiene densidades promedio cercanas a 1.000 árboles/ha.

La venta del grano de cacao se realiza principalmente a través de comercializadoras ubicadas en las cabeceras municipales, lo que, junto a la pertenencia a asociaciones comunitarias, permite obtener mejores precios y pagos más oportunos, fortaleciendo así la sostenibilidad económica del grupo (Cadena Regional de Cacao, 2012).

Los productores de este clúster evidencian prácticas agrícolas más diversificadas y oportunas en comparación con el promedio regional, lo que les permite alcanzar productividades superiores a la media nacional de 550 kg/ha/año (MADR, 2007). De acuerdo con Fedecacao (2018), estos niveles de producción son característicos de sistemas de tecnología mediana, cuyos rendimientos oscilan entre 500 y 1.000 kg/ha/año en el ámbito nacional. Asimismo, estudios como el de Hidalgo et al. (2014) han demostrado que las fincas con productividad en este rango presentan estructuras productivas estables y diversificadas.

En resumen, el Clúster 1 representa un grupo de productores que, a partir de una combinación de buenas prácticas agronómicas, participación

organizativa y condiciones agroecológicas favorables, logra niveles de productividad competitivos que superan el promedio regional, con lo cual sientan las bases para fortalecer su inserción en mercados especializados y consolidar sistemas de producción más sostenibles.

4.3.2 Clúster 2

El Clúster 2 está conformado por el 10 % de los agricultores analizados. Este grupo se caracteriza por producir entre 301 y 600 kg/ha/año de cacao seco, situándose por debajo del promedio nacional de 550 kg/ha/año (MADR, 2007). Sus fincas se ubican a distancias menores de un kilómetro respecto de los principales poblados, lo que les facilita cierto acceso a mercados, aunque con limitaciones en el manejo agronómico del cultivo.

En términos de composición productiva, las fincas presentan especies de sombrío constituidas principalmente por musáceas y frutales, cuyos productos se destinan ante todo a la venta. En su mayoría, la mano de obra utilizada es familiar, aunque buena parte del tiempo laboral disponible se dedica a actividades distintas a las labores agrícolas, lo cual desfavorece la atención continua y especializada del cacao. A pesar de que los operarios llevan registros de producción, en promedio, la composición familiar es de cinco personas; además, la falta de capacitación técnica adecuada reduce la eficiencia en las labores agrícolas, tales como deshierbas, podas y manejo fitosanitario.

Este patrón de manejo intermitente explica las bajas productividades observadas en el clúster. De acuerdo con Hidalgo et al. (2014), en sistemas similares, la combinación de plantas híbridas improductivas, escasas prácticas de deshierba (solo dos al año) y ausencia de poda sistemática limita el potencial productivo, que lo sitúa en valores medios cercanos a los 623,4 kg/ha/año. A su vez, Arévalo & Zúñiga (2002) señalan que en sistemas de cacao donde predomina la mano de obra familiar (60 % del total), los niveles de productividad tienden a ser promedio o inferiores, en especial, cuando no se acompaña de capacitación técnica.

Aunque la diversificación de actividades en las fincas puede aumentar la sostenibilidad económica, como lo señalan Ferro & Meneses (1996), en este clúster dicha diversificación no se traduce en un fortalecimiento del sistema cacaotero. La venta de productos asociados no necesariamente implica una reinversión adecuada en el mantenimiento del cultivo principal, afectando la sostenibilidad agroecológica y la competitividad del sistema productivo.

En síntesis, el Clúster 2 agrupa a productores que, si bien mantienen una estructura agroforestal diversificada y están vinculados a organizaciones comunitarias, requieren intervenciones específicas orientadas a mejorar las prácticas agronómicas básicas, fortalecer la capacitación técnica de la mano de obra familiar, y promover estrategias de reinversión productiva para elevar la eficiencia y la rentabilidad de sus sistemas cacaoteros.

4.3.3 Clúster 3

El Clúster 3 agrupa al 60 % de los agricultores analizados, cuyas fincas presentan rendimientos inferiores a 300 kg/ha/año de cacao seco, hecho que evidencia el nivel más bajo de productividad entre los clústeres identificados. Estas fincas se localizan a distancias que oscilan entre 1.5 y más de 5 kilómetros del poblado principal, que se ubican en zonas de colinas moderadas, donde la topografía accidentada aumenta los riesgos de volcamiento de los árboles y dificulta el acceso a las parcelas.

La densidad de siembra observada en este grupo es baja, con promedios que varían entre 200 y 400 árboles por hectárea. La combinación de caminos veredales y transporte fluvial como únicos medios de acceso implica costos elevados y tiempos prolongados para llegar a las fincas, lo cual es una seria limitación a la atención oportuna de los cultivos. Esta situación estructural se traduce en sistemas cacaoteros envejecidos, afectados por enfermedades fitosanitarias como la moniliasis (*Moniliophthora roreri*) y la escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*), donde predomina el material genético de tipo criollo.

En términos de uso del sombrío, las especies forestales y frutales presentes en las fincas se destinan sobre todo al intercambio de mano de obra, práctica tradicional que refleja las dificultades de acceso a servicios laborales formales en la región, agudizadas por la presencia de cultivos ilícitos que absorben fuerza laboral. La venta del grano de cacao se realiza a través de organizaciones comunitarias locales, aunque la baja escala de producción limita su impacto económico.

Estudios previos confirman estas condiciones. Preciado et al. (2011) reportaron producciones promedio de 265,7 kg/ha/año en fincas con sistemas de baja densidad (200 árboles/ha) y material criollo en zonas similares. De manera consistente, Hidalgo et al. (2014) señalaron que en estas condiciones de infraestructura, manejo y material vegetal, resulta improbable lograr sistemas cacaoteros rentables, ya que la diversificación no compensa los elevados costos y puede conducir al abandono paulatino del cultivo.

En síntesis, el Clúster 3 representa a un amplio grupo de productores inmersos en sistemas de baja productividad y alta vulnerabilidad estructural. Los resultados evidencian la necesidad de intervenciones integrales, enfocadas en la renovación varietal, la mejora de la infraestructura rural, la atención fitosanitaria y el fortalecimiento de capacidades técnicas para revertir las condiciones de rezago que caracterizan este segmento de la producción cacaotera en Tumaco.

4.4 Análisis de las Variables con Mayor Contribución a los Componentes

4.4.1 Producción de Cacao Seco (PCS)

La variable producción de cacao seco (PCS) mostró diferencias significativas entre los clústeres definidos en esta investigación. En el Grupo I, los productores alcanzan rendimientos promedio de aproximadamente 600 kg/ha/año, situándolos por encima del promedio regional y acercándolos a niveles considerados tecnificados. El Grupo II registró producciones intermedias, fluctuando entre 300 y 600 kg/ha/año, mientras que el Grupo

III, que reúne al 60 % de los agricultores, evidenció rendimientos inferiores a 300 kg/ha/año, muy por debajo de la media nacional estimada en 550 kg/ha/año (MADR, 2007).

En el contexto local, el promedio de rendimiento para Tumaco se sitúa alrededor de 480 kg/ha/año, según reporta Cordeagropaz (2015). Este dato corrobora que, incluso en el orden regional, la productividad de cacao presenta desafíos estructurales. Fedecacao (2018) también señala que en Colombia persisten numerosas plantaciones de cacao con rendimientos inferiores a 500 kg/ha/año, caracterizadas por sistemas deteriorados, baja densidad de árboles y escasa renovación varietal.

Estos hallazgos reflejan que la baja productividad de la mayoría de los sistemas de cacao en Tumaco no responde únicamente a factores agronómicos, sino también a la falta de intervenciones técnicas adecuadas y oportunas en las distintas zonas productoras. La persistencia de plantaciones envejecidas, el limitado acceso a servicios de asistencia técnica, y las restricciones de infraestructura agravan la situación, reproduciendo ciclos de baja rentabilidad y vulnerabilidad económica para los pequeños productores.

La caracterización del rendimiento por clúster subraya la importancia de implementar estrategias diferenciadas de mejoramiento, priorizando acciones específicas de renovación de cultivos, rehabilitación productiva y, en especial, el fortalecimiento organizativo en los segmentos más rezagados.

La baja productividad observada en la mayoría de los sistemas de producción de cacao en Tumaco se explica por múltiples factores interrelacionados. Entre ellos sobresale el uso de materiales genéticos de bajo rendimiento, la edad avanzada de las plantaciones y la falta de manejo fitosanitario adecuado, que favorece la proliferación de enfermedades como la moniliasis y la escoba de bruja; factores que al combinarse impactan de manera directa la capacidad productiva de las fincas.

Asimismo, el sector cacaotero en la región presenta un bajo nivel tecnológico en las prácticas de producción, cosecha y beneficio del grano, lo

que limita la eficiencia del sistema en todas las fases de la cadena de valor (Fedecacao, 2018). Esta situación afecta los rendimientos físicos y repercute en la calidad del grano ofertado, lo que afecta su competitividad en mercados nacionales e internacionales.

De acuerdo con Calzada et al. (2013), la baja rentabilidad de la actividad cacaotera deriva de prácticas agronómicas inadecuadas, mal uso del suelo, bajos precios del grano y dificultades de acceso al mercado, asociadas principalmente a deficiencias en la calidad del producto. Condiciones estructurales que limitan las oportunidades de desarrollo económico de los pequeños productores y que perpetúan los ciclos de pobreza rural.

En este sentido, mejorar la productividad del cacao en Tumaco no implica únicamente aumentar los volúmenes de producción, sino también renovar los sistemas productivos, mejorar el manejo agronómico, elevar los estándares de calidad y fortalecer el acceso a mercados diferenciados, componentes esenciales para avanzar hacia un modelo de producción cacaotero más competitivo y sostenible.

4.4.2 Distancia a la Finca (DIST)

La variable distancia a la finca (DIST) mostró diferencias marcadas entre los clústeres analizados. En los grupos I y II, la mayoría de las fincas se ubican a distancias menores o iguales a un kilómetro desde las veredas donde residen los agricultores. En principio, esa cercanía favorece una mejor atención de los cultivos y facilita el acceso a insumos, asistencia técnica y comercialización.

En contraste, el Grupo III, que concentra al 60 % de los agricultores estudiados, presenta fincas localizadas a distancias que oscilan entre 1.5 y 5 kilómetros del centro poblado más cercano. Esas distancias, combinadas con la falta de vías de acceso adecuadas –como carreteras terciarias, caminos en buen estado o trochas transitables– y, en algunos casos, la necesidad de transporte fluvial, constituyen una limitante crítica para la gestión oportuna de las actividades agrícolas.



La lejanía y las dificultades de transporte impactan de manera directa en la capacidad de los productores para realizar labores esenciales de mantenimiento del cultivo de cacao y de las especies asociadas. Las restricciones en la movilidad incrementan los costos de operación y reducen la frecuencia de atención a las plantaciones, pero también dificultan la implementación de prácticas técnicas adecuadas, que afectan la productividad y comprometen la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas productivos.

Esos resultados refuerzan la necesidad de considerar el factor accesibilidad territorial como un eje estratégico en los programas de intervención rural, que prioricen acciones de mejoramiento de infraestructura y estrategias logísticas adaptadas a las condiciones geográficas de Tumaco.

Este escenario de limitada accesibilidad no es un fenómeno aislado. Según Cordeagropaz (2015), aunque existen vías terciarias que conducen hasta las veredas principales de la zona rural de Tumaco, la comunicación entre las veredas y las fincas se realiza principalmente a través de caminos de herradura o senderos peatonales, lo que dificulta el acceso directo a las unidades productivas y aumenta significativamente los costos de producción del cacao.

De manera similar, Calzada et al. (2013) destacan que el deteriorado estado de las vías rurales incrementa los tiempos de desplazamiento, y que en ocasiones los obliga a usar el transporte fluvial, con el consiguiente incremento en los costos de combustible y reducción de la frecuencia en la realización de labores agrícolas oportunas y adecuadas. Dese luego, esas condiciones afectan de manera directa la eficiencia productiva y limitan el acceso a mercados, asistencia técnica y programas de apoyo rural.

En contraste, experiencias en otros contextos latinoamericanos como el de Ecuador muestran que la infraestructura vial en buen estado puede ser un factor determinante para mejorar la eficiencia productiva y la competitividad del sector agropecuario. Alcívar (2019) reporta que en varias zonas cacaoteras de Ecuador, la existencia de vías rurales adecuadas facilita la movilización oportuna de productos desde y hacia las fincas, para

así favorecer el acceso a servicios de apoyo, insumos agrícolas y mercados y, con ello, reducir de forma significativa los costos logísticos.

Dicho contraste evidencia que la infraestructura vial constituye un factor físico de acceso y un elemento estratégico para el desarrollo rural. Mejorar las condiciones de transporte en Tumaco podría tener un impacto directo en la sostenibilidad y competitividad de los sistemas cacaoteros tradicionales, en pro de abrir nuevas oportunidades de dinamización económica y fortalecimiento productivo.

4.4.3 Especies de Sombrío (ESPS)

La variable especies de sombrío (ESPS) reveló diferencias notables en los sistemas de producción de cacao analizados. En el Grupo I, las fincas presentan asociaciones de cacao con musáceas (plátano, banano) y frutales; así, conforman sistemas diversificados que favorecen la resiliencia productiva. En el Grupo II, el sombrío está compuesto predominantemente por musáceas, y por una menor diversidad de especies acompañantes. Por su parte, el Grupo III exhibe asociaciones más complejas, al integrar musáceas, frutales y especies forestales.

Esos patrones son consistentes con las observaciones de Preciado et al. (2011), quienes caracterizaron el sistema tradicional de producción de cacao en Tumaco como arreglos agroforestales con diversidad espacial y temporal, conformados por cacao, especies de musáceas, frutales y árboles maderables.

La diversidad de especies de sombrío cumple múltiples funciones en los sistemas cacaoteros: proporciona protección contra la radiación solar excesiva, mejora la conservación del suelo, regula el microclima, aporta productos complementarios para el autoconsumo o la venta, y contribuye a la sostenibilidad ambiental del sistema. Sin embargo, una composición de sombrío muy denso o mal manejado también puede afectar negativamente la productividad del cacao, porque las condiciones de alta humedad pueden aumentar la incidencia de enfermedades como la moniliasis.



En este sentido, el tipo y manejo de las especies de sombrío deben ser considerados como variables estratégicas en la optimización de los sistemas agroforestales de cacao en Tumaco, al combinar la conservación de biodiversidad con prácticas agronómicas que permitan maximizar la producción y garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

Además de su función ecológica, las especies de sombrío en los sistemas tradicionales de cacao en Tumaco cumplen importantes roles socioeconómicos. De manera particular, el plátano es la especie de sombrío transitorio más utilizada, sirviendo como fuente de alimento para el núcleo familiar y como complemento económico mediante su venta en mercados locales (Torres & Dajome, 2020).

La multifuncionalidad de las especies de sombrío refleja la lógica agroforestal que subyace a estos sistemas. Según Fedecacao (2015), los sistemas agroforestales de cacao implican la asociación en el tiempo y el espacio de dos o más especies en una misma área, buscando no solo mejorar las condiciones productivas del cultivo principal, sino también diversificar los productos, aumentar la resiliencia económica de los hogares rurales y promover la conservación de recursos naturales.

Así, los arreglos de sombrío en los cacaotales de Tumaco representan una estrategia integral de manejo que combina producción, seguridad alimentaria y sostenibilidad ambiental. No obstante, el desafío persiste en lograr un equilibrio adecuado: una densidad y composición de sombrío que aporte beneficios ecológicos y económicos, sin comprometer la productividad del cacao ni incrementar los riesgos fitosanitarios.

Por tanto, el manejo estratégico de las especies de sombrío se consolida como una línea prioritaria de intervención para fortalecer la competitividad y sostenibilidad de los sistemas de producción de cacao en la región.

La diversidad de especies de sombrío en los sistemas de producción de cacao de Tumaco responde a criterios agronómicos y a estrategias de diversificación productiva. Según Hidalgo et al. (2015), en estos sistemas

tradicionales no se cultiva únicamente cacao, sino que se integran cultivos alimentarios básicos como plátano, yuca, maíz, e incluso actividades ganaderas que configuran sistemas agroforestales multifuncionales, y sirven de apoyo a la seguridad alimentaria y la generación de ingresos complementarios.

Sin embargo, la relación entre sombrío y productividad no es lineal. Estudios realizados en Ghana (África) por Clough et al. (2009) reportan que la reducción de la sombra, en particular, la supresión de árboles maderables, frutales y plátanos produjo un aumento significativo en el rendimiento de la cosecha de cacao. Esto evidencia que, si bien el sombrío aporta múltiples beneficios ecológicos y sociales, un exceso de cobertura o un manejo inadecuado pueden afectar negativamente la productividad del cultivo principal.

Esos hallazgos subrayan la importancia de un manejo estratégico y equilibrado de las especies de sombrío en los sistemas cacaoteros tradicionales. La clave no radica en eliminar la sombra –lo que comprometería la resiliencia ecológica del sistema–, sino en optimizar su composición, densidad y estructura de manera que se maximicen tanto los beneficios productivos como los ecosistémicos.

En el contexto de Tumaco, promover un manejo técnico del sombrío, adaptado a las condiciones locales, puede ser un elemento crítico para aumentar la productividad del cacao, mantener la diversidad biológica y fortalecer la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas agroforestales.

4.4.4 Mano de Obra (MNO)

La variable mano de obra (MNO) presentó diferencias sustanciales entre los sistemas de producción de cacao analizados en Tumaco. En el Grupo I, los productores combinan mano de obra familiar y contratada, lo que permite una atención oportuna y adecuada de las labores de cultivo, lo que se refleja en mayores niveles de productividad. En el Grupo II, la mano de obra es, ante todo, familiar, pero su disponibilidad es intermitente, debido



a que los miembros del hogar destinan parte significativa de su tiempo a otras actividades no agrícolas, lo que repercute negativamente en la atención al cacao. En el Grupo III, también prima la mano de obra familiar, con algunos casos de contratación eventual o intercambio de trabajo, aunque su realización es esporádica y sin planificación sistemática.

Al respecto, los productores son conscientes de que el financiamiento y la disponibilidad de mano de obra son factores críticos para realizar las labores de mantenimiento oportuno que permitirían aumentar la productividad de las fincas. Sin embargo, las restricciones económicas y la dispersión de actividades laborales fuera del ámbito agrícola limitan esas posibilidades.

Preciado et al. (2011) señalan que en sistemas tradicionales similares, los productores dedican en promedio el 40 % de su tiempo de trabajo al cultivo de cacao, pero de manera esporádica y sin una planificación estructurada de actividades agronómicas, lo que afecta la eficiencia y el rendimiento del sistema. De manera complementaria, Espinosa et al. (2015) estiman que en sistemas de explotación comercial con densidades de 1.000 a 1.100 árboles por hectárea se requiere una inversión aproximada de 214 jornales ha/año, incluyendo labores agronómicas, aplicación de insumos y asistencia técnica.

Estos datos reflejan la brecha existente entre las necesidades reales de mano de obra para un manejo agronómico adecuado y la disponibilidad y gestión efectiva de la misma en los sistemas tradicionales de Tumaco. El fortalecimiento de la organización del trabajo en finca, el aseguramiento de mecanismos de financiamiento para contratación o intercambio de mano de obra y la promoción de la planificación de las labores agrícolas emergen como estrategias clave para mejorar la eficiencia productiva y la sostenibilidad del cultivo de cacao en la región.

En concordancia con esos resultados, Hidalgo et al. (2014) encontraron que aunque la disponibilidad de mano de obra familiar es limitada en varios sistemas de producción de cacao, esta restricción puede ser compensada mediante la contratación de mano de obra particular, siempre

y cuando esté adecuadamente supervisada. En su estudio, las fincas que adoptaron esa estrategia alcanzaron producciones de hasta 933 kg/ha/año, lo cual evidencia que la gestión eficiente del recurso humano es un factor crítico para elevar los niveles de productividad.

Lo anterior permite subrayar la importancia de fortalecer los programas de extensión rural y asistencia técnica como mecanismo para mejorar las prácticas de manejo de la mano de obra en el cultivo de cacao. De acuerdo con Sánchez (1990), la efectividad de las recomendaciones técnicas en cultivos permanentes como el cacao depende tanto de la disponibilidad de tecnologías adecuadas como de la capacidad de implementación por parte de los productores, lo que a su vez está condicionado por la organización y supervisión del trabajo agrícola.

Por lo expuesto, el contexto de Tumaco requiere de una estrategia integral para mejorar la producción de cacao, que considere la capacitación técnica y la optimización de la gestión de mano de obra, al tiempo que promueva mecanismos de contratación responsable, formación de cuadrillas especializadas y una planificación agronómica basada en las necesidades reales de cada sistema de producción.

4.4.5 Registro de Actividades y Costos de Producción (RAC)

El análisis de la variable Registro de actividades y costos de producción (RAC) mostró diferencias relevantes entre los grupos de productores de cacao evaluados en Tumaco. En el Grupo I, los productores realizan registros sistemáticos tanto de las actividades agronómicas como de los costos de producción, lo que les permite un mejor control de sus procesos productivos y una gestión financiera más eficiente. En contraste, en el Grupo II, los registros se limitan a las cosechas y son realizados de manera intermitente, dificultando el seguimiento integral del sistema. En el Grupo III, los registros son aún más esporádicos y se enfocan en las actividades realizadas, sin documentar de forma sistemática los volúmenes de cosecha ni los costos asociados.



La falta de registros oportunos y completos impide que los productores puedan evaluar adecuadamente la relación inversión-rentabilidad, lo que limita la capacidad para tomar decisiones informadas acerca de la gestión de sus fincas y reduce las posibilidades de optimización técnica y económica del sistema productivo.

De acuerdo con Paredes (2001), en muchos sistemas agrícolas tradicionales se subestiman costos relevantes, como los derivados de la distancia de las fincas respecto de los centros poblados, ya que no son registrados de manera formal en los costos de producción por unidad de área. Esa omisión genera una subvaloración de los costos reales y afecta la percepción de rentabilidad y la sostenibilidad económica del cultivo.

Esos hallazgos generan la necesidad de promover la adopción de prácticas sistemáticas de registro contable y técnico entre los productores de cacao en Tumaco, como herramienta fundamental para mejorar la eficiencia de los sistemas productivos, facilitar el acceso a programas de apoyo financiero y asistencia técnica, al igual que fortalecer la competitividad del sector en el mediano y largo plazo.

La importancia de llevar registros sistemáticos en los sistemas de producción de cacao es ampliamente reconocida por diversas fuentes técnicas. Fedecacao (2018) enfatiza que los productores deben documentar detalladamente todas las actividades realizadas en la finca, incluyendo la aplicación de fertilizantes, mantenimiento de equipos, gestión de personal, registro de jornales, inventario de maquinaria e insumos, así como las actividades de cosecha y comercialización de productos. Esa práctica permite determinar con precisión la rentabilidad de los sistemas productivos y facilita la identificación de áreas críticas para la mejora continua.

En el mismo sentido, Cordeagropaz (2015) sostiene que llevar registros de producción es fundamental para que los agricultores puedan evaluar periódicamente (trimestral o semestralmente) los costos de producción, con el fin de implementar estrategias de optimización y reducción de costos en actividades recurrentes como el control de malezas, poda, manejo fitosanitario y compra de insumos.

En el contexto de Tumaco, esos elementos resultan estratégicos, debido a que los márgenes de rentabilidad de los sistemas tradicionales de cacao son estrechos y la sostenibilidad económica depende en gran medida de la eficiencia en el uso de los recursos. Entonces, la adopción de registros sistemáticos contribuye a una mejor planificación agronómica y constituye una herramienta de gestión empresarial esencial para fortalecer la competitividad del pequeño productor cacaotero en mercados cada vez más exigentes.

Por ende, fomentar la cultura del registro en el sector cacaotero de Tumaco puede representar una estrategia transformadora de bajo costo, capaz de mejorar significativamente la productividad, la rentabilidad y la sostenibilidad de los sistemas de producción tradicionales.

4.4.6 Venta del Grano de Cacao Seco (VGCS)

La comercialización del cacao en Tumaco por parte de los productores se realiza en primer lugar a través de la venta de grano seco. Los agricultores pertenecientes al Grupo I y Grupo II comercializan su producción en las principales casas comerciales del municipio, como *Chocolate Tumaco* y *Comcacaot S.A.S.*, financiadas por grandes compañías nacionales como *Casa Luker* y *Nacional de Chocolates*. El principal tipo de cacao comercializado en esos circuitos es el cacao corriente, destinado a los mercados nacionales tradicionales.

Por otro lado, los agricultores del Grupo III, que representan la mayoría en este estudio, realizan la venta de su cacao en unidades de negocio de organizaciones comunitarias ubicadas en las veredas. Por lo general, esa comercialización se efectúa en grano fresco, en el marco de una estrategia de comercialización asociativa impulsada con el apoyo de proyectos de cooperación internacional. Ese tipo de iniciativas ha promovido la creación de una red de centros de beneficio de cacao gestionados por asociaciones locales, con el objetivo de fortalecer la comercialización colectiva, reducir los costos logísticos y facilitar el acceso a mercados diferenciados que reconocen el valor de un proceso de calidad mejorado, al ofrecer precios justos a los productores.



La venta colectiva y la mejora en los procesos de beneficio representan una oportunidad estratégica para elevar los ingresos de los pequeños productores, mejorar la calidad del grano, y consolidar prácticas de comercio más equitativas, pero también plantean desafíos importantes en términos de estandarización de la calidad, gestión organizativa y sostenibilidad de los modelos asociativos en el largo plazo.

En ese sentido, el fortalecimiento de las capacidades locales para el manejo poscosecha, la agregación de valor y la articulación con nichos de mercado especializados se presenta como una prioridad para mejorar la competitividad del sector cacaotero en Tumaco y promover su sostenibilidad económica y social.

La importancia de la comercialización asociativa en el sector cacaotero de Tumaco también ha sido resaltada por diversos estudios recientes. Espinosa et al. (2015) señalan que en varios casos, los productores logran articular su proceso de comercialización a través de organizaciones locales, lo que les permite contrarrestar en parte la volatilidad del precio del grano de cacao en el mercado. Incluso, algunas asociaciones han conseguido acceder a capital de trabajo mediante préstamos facilitados por grandes compañías exportadoras, lo cual les permite fortalecer su capacidad operativa y mejorar sus condiciones de negociación.

En esa misma línea, Calzada et al. (2013) advierten que el modelo de comercialización individual presenta importantes desventajas estructurales para los pequeños productores, debido a los altos costos de transacción y las grandes distancias que deben recorrer para transportar el grano hacia los centros de compra. Ante ese panorama, la consolidación de estrategias comerciales asociativas surge como una vía esencial para reducir costos, mejorar el poder de negociación de los agricultores, y facilitar el acceso a mercados de mayor valor agregado.

Esos hallazgos refuerzan la necesidad de seguir promoviendo modelos de comercialización colectiva, acompañados de estrategias de fortalecimiento organizativo, gestión empresarial y capacitación en estándares de

calidad, que permitan a los productores de cacao de Tumaco incrementar su competitividad, mejorar sus ingresos y consolidar su inserción en mercados especializados nacionales e internacionales.

Así mismo, resulta fundamental reconocer que el fortalecimiento de la comercialización de cacao en Tumaco no depende únicamente de la organización y esfuerzo individual de los productores. Como señala la Cadena Regional de Cacao (2012), para que la política comercial del sector sea verdaderamente viable y sostenible, se requiere de un compromiso efectivo de todos los actores de la cadena de valor: gobierno, gremios productivos, organizaciones de productores, empresas compradoras y otros agentes relacionados.

El enfoque sistémico implica que las iniciativas de apoyo a la producción y comercialización de cacao deben estar articuladas a políticas públicas integrales, programas de fortalecimiento organizativo, estrategias de acceso a financiamiento, y mecanismos de articulación comercial justa, que reconozcan el valor social, económico y ambiental de los sistemas de producción tradicionales.

La construcción de un entorno comercial inclusivo y equitativo para el cacao de Tumaco precisa esfuerzos conjuntos de finqueros, la organización comunitaria y de la acción coordinada y corresponsable de todo el ecosistema cacaotero. Solo a través de ese enfoque integral será posible mejorar de manera sostenible los ingresos de los productores, fortalecer su resiliencia económica y consolidar su inserción en mercados diferenciados de mayor valor agregado.

4.4.7 Topografía de la Finca (TFI)

La topografía de las fincas es diversa; las del grupo I y II se concentran en zona de planicie o vegas, las del grupo III en colinas o lomeríos, razón por la cual la mayoría de los productores indican que se les dificulta realizar las actividades del manejo integral del cultivo y presentan riesgo en general de volcamientos de los árboles en época de inviernos. El volcamiento



hace que no se cuente con la densidad y distribución adecuada de árboles lo que afecta el manejo y la productividad.

Fedecacao (2018) puntualiza que en la región del Pacífico colombiano se ubican las plantaciones con la más baja tecnología y rendimientos inferiores a los 500 kg/ha-1año-1 y corresponden a cultivos viejos, deteriorados y con muy pocos árboles por hectárea.

La FAO (2007) indica que la productividad de las fincas va a depender de la intensidad de la mano obra dedicada, sin embargo, existen condiciones topográficas de las fincas que no permiten realizar las labores agronómicas adecuadas y los costos son muy altos para dedicarle a la rehabilitación de plantaciones de los sistemas productivos. Apeco (1995) agrega que la deforestación de laderas causa una rápida erosión de los suelos y la pérdida de los sistemas productivos, afectando los ingresos de los agricultores que dependen de esos sistemas y hacen que su atención sea intermitente al transcurrir del tiempo.

4.4.8 Uso de las Especies (USE)

El análisis de la variable uso de las especies (USE) evidenció diferentes estrategias entre los grupos de productores en relación con los cultivos asociados al cacao. En el Grupo II, la producción de especies acompañantes, principalmente, musáceas y frutales se destina en principio a la venta en mercados locales durante las épocas de cosecha, ya que genera ingresos complementarios a la actividad cacaotera. En cambio, en el Grupo III, los productos de los cultivos asociados se destinan ante todo al intercambio de mano de obra, por cuanto ofrece frutas y madera como forma de pago o compensación por labores agrícolas realizadas en la finca.

El uso diversificado de las especies asociadas cumple un papel crucial en la sostenibilidad económica de las explotaciones. Según los datos obtenidos, un 40 % de la producción de musáceas se destina a la venta directa, un 30 % se utiliza para el consumo familiar como parte de la estrategia de seguridad alimentaria, y un 30 % se emplea en el intercambio de trabajo.

Esa distribución refleja la multifuncionalidad de los sistemas agroforestales tradicionales de cacao en Tumaco, donde las especies asociadas contribuyen a la diversificación productiva y también fortalecen los mecanismos de resiliencia económica y social de las familias rurales. La venta directa genera liquidez inmediata, el autoconsumo reduce la dependencia externa de alimentos, y el intercambio de productos facilita el acceso a mano de obra sin necesidad de endeudamiento monetario formal.

En consecuencia, el manejo estratégico de los cultivos asociados representa una herramienta clave para mejorar la viabilidad económica de los sistemas de producción tradicionales de cacao en contextos de limitada liquidez y acceso restringido a servicios financieros.

Los patrones de uso diversificado de los recursos agroforestales en Tumaco se insertan en una estrategia de vida más amplia de las comunidades rurales del Pacífico colombiano. Espinosa et al. (2015) destacan que una de las principales características de los pobladores de esa región es la diversificación cotidiana de actividades económicas, que incluye la pesca, la recolección y uso de madera, la caza y la venta ocasional de mano de obra, realizadas diariamente para suplir las necesidades básicas de las familias. De manera complementaria, Rodríguez et al. (1996) documentan que las estrategias de subsistencia involucran faenas estacionales o eventuales que pueden extenderse entre 20 a 45 días, en actividades como la pesca, la caza, la extracción de madera y la venta de productos de pan coger durante las temporadas de cosecha.

Esa diversificación refleja la adaptabilidad histórica de las comunidades frente a condiciones económicas y ecológicas variables, y también es un elemento fundamental de resiliencia socioeconómica en contextos rurales donde los ingresos provenientes de un solo cultivo, como el cacao, resultan insuficientes para garantizar la seguridad alimentaria y el bienestar de los hogares.

Por tanto, es crucial entender esa multiplicidad de estrategias productivas para diseñar intervenciones de apoyo que no busquen sustituir esta



diversidad, sino integrarla y fortalecerla como parte de un modelo de desarrollo rural sostenible en Tumaco.

4.5 Tipificación de los Sistemas de Producción Tradicionales de Cacao

Una vez analizados los resultados del Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM) y el Análisis de Clúster, se identificaron y definieron tres tipologías principales de sistemas tradicionales de producción de cacao en Tumaco. Para profundizar en la caracterización de cada tipología, se seleccionó 10 fincas representativas por grupo, se realizó verificación de campo de las variables de interés, y se efectuó entrevistas semiestructuradas a los respectivos productores.

Las entrevistas exploraron múltiples dimensiones del sistema de producción, incluyendo experiencias exitosas en el cultivo de cacao, factores limitantes que desincentivan la dedicación exclusiva a esa actividad, y percepciones relacionadas con la comercialización del grano. El enfoque cualitativo permitió capturar información valiosa no observable cuantitativamente, lo cual reveló dinámicas productivas, sociales y económicas críticas para entender la sostenibilidad de los sistemas analizados.

Un tema transversal emergente en los diálogos con los productores fue la problemática del relevo generacional. La mayoría de los productores entrevistados superan los 60 años, y manifestaron preocupación por la falta de interés de mujeres y jóvenes en continuar con la actividad cacaotera. Esa tendencia plantea serios riesgos para la sostenibilidad a mediano plazo del cultivo de cacao en la región, dado que, sin una estrategia eficaz de vinculación de nuevas generaciones, la actividad podría volverse insostenible en un horizonte de diez años.

Así, la tipificación de los sistemas tradicionales de cacao en Tumaco permite comprender sus características agronómicas y económicas y, a la vez, revela retos estructurales y sociales fundamentales que deben ser abordados para asegurar la viabilidad futura del sector.

4.5.1 Fincas con Rendimientos Superiores a 1000 kg/ha¹ (Tipo 1)

Esa tipología agrupa al 3 % de las fincas muestreadas (32 unidades productivas), caracterizadas por alcanzar rendimientos superiores a 1.000 kg/ha/año de cacao seco. Las fincas presentan áreas dedicadas al cacao de entre 6 y 7 hectáreas, con una densidad de siembra promedio de 1.000 árboles por hectárea, que configura un sistema productivo de alta intensidad.

Los cultivos pertenecen a las variedades CCN 51 y ICS 95, ambas procedentes de material clonado, lo que garantiza uniformidad genética y mayor potencial de producción. La edad promedio de los cultivos es de 10 años, y los sistemas agroforestales asociados incluyen especies de sombra forestales como *Cedrela odorata* (cedro) y *Carapa guianensis* (tanga-re), en una densidad aproximada de 30 árboles de sombra por hectárea.

El manejo agronómico es intensivo y tecnificado. Se realiza control aproximado de malezas de seis veces al año, y control fitosanitario de enfermedades críticas como moniliasis (*Moniliophthora roreri*), escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*) y pudrición parda (*Phytophthora sp.*) cada ocho días. Igual, se efectúan podas de mantenimiento o despunte cada tres meses para garantizar la adecuada aireación y estructura de las plantas.

Los productores de este grupo registran sistemáticamente sus actividades y producción, aplican fertilización anual con dosis mínimas de NPK (nitrógeno, fósforo, potasio) adaptadas a las necesidades del cultivo, y participan con regularidad en capacitaciones técnicas especializadas en manejo de cacao.

El conjunto de prácticas agronómicas, administrativas y de formación continua explica los altos niveles de productividad observados en las fincas Tipo 1, consolidándolas como modelos de referencia estratégica para el diseño e implementación de estrategias de mejora del sector cacaotero en Tumaco. Su experiencia demuestra que la adopción integrada de buenas prácticas técnicas y organizativas es un camino viable para incrementar la



competitividad y sostenibilidad de los sistemas de producción tradicionales de cacao en la región.

La caracterización de las fincas Tipo 1 tiene respaldo en estudios realizados en otros contextos cacaoteros. Hidalgo et al. (2014) reportaron que en su tipificación de sistemas de producción de cacao, el Grupo I, compuesto por fincas que desarrollaban actividades productivas acordes al manejo agronómico del cultivo, alcanzó rendimientos promedio de 963.46 kg/ha/año, cifra que supera tanto la media regional como la media nacional registrada en Colombia para ese periodo.

De manera complementaria, Fedecacao (2018) señala que en el país existen cultivos tecnificados que logran producciones entre 1.000 y 3.000 kg/ha/año, en específico, en sistemas establecidos con materiales clonales de alto rendimiento y bajo condiciones de manejo agronómico intensivo. Del mismo modo, Arévalo y Zúñiga (2002) documentaron que, en ciertos grupos de productores altamente tecnificados, los valores de producción podían alcanzar hasta 2.562 kg/ha/año, si se utilizan clones de alta productividad.

Estos antecedentes corroboran que los niveles de producción observados en las fincas Tipo 1 de Tumaco son técnicamente viables y comparables a los mejores estándares nacionales, siempre y cuando se implementen prácticas agronómicas adecuadas, materiales genéticos mejorados y un manejo técnico disciplinado del cultivo.

La existencia de fincas en Tumaco con rendimientos superiores a 1.000 kg/ha/año favorece la implementación de programas de extensión rural y asistencia técnica orientados a la replicabilidad de buenas prácticas agronómicas. Como señala Sánchez (1990), disponer de experiencias exitosas en el manejo de cultivos permite acelerar los procesos de transferencia de conocimiento técnico y la adopción de innovaciones por parte de otros productores.

En esa perspectiva, Cordeagropaz (2015) enfatiza que alcanzar niveles de producción superiores a 1.000 kg/ha/año configura un modelo productivo rentable y una alternativa sostenible para el fortalecimiento del

sector cacaotero en la región. Esos resultados ratifican que bajo condiciones adecuadas de manejo, el cacao puede convertirse en una actividad económica viable y socialmente relevante para las comunidades rurales de Tumaco.

Por tanto, las fincas Tipo 1 constituyen modelos de referencia desde lo técnico y representan pilares estratégicos para el desarrollo territorial basado en el cacao, al contribuir con la construcción de sistemas agroforestales más competitivos, resilientes y sostenibles.

4.5.2 Fincas con Rendimientos entre 600 y 1000 kg/ha-1 (Tipo 2)

Esta tipología agrupa al 12 % de las fincas muestreadas (144 unidades productivas) y presenta rendimientos de cacao seco que oscilan entre 600 y 1.000 kg/ha/año. Las áreas de cultivo de cacao en estas fincas se sitúan en un rango de 3.5 a 5.5 hectáreas, con una densidad promedio de 886 árboles por hectárea.

La edad media de los cacaotales es de 14 años, y las variedades cultivadas incluyen CCN 51, ICS 95, cacao criollo y otras variedades híbridas como MON 1 y TSH 565, reflejo de una diversidad genética moderada en los sistemas productivos. Esos materiales están asociados con un promedio de 420 plantas de musáceas por hectárea (plátano principalmente) y un aproximado de 35 árboles frutales por hectárea, entre los que destacan cítricos (*Citrus spp.*), guaba (*Inga sp.*) y guanábana (*Annona muricata*).

En cuanto a las prácticas agronómicas, se observa una intensidad de manejo intermedia: el control fitosanitario se realiza cada mes, el control de malezas cuatro veces al año, y la poda de mantenimiento dos veces al año, en promedio. La fertilización es esporádica; se aplica dosis muy reducidas de fertilizantes NPK, lo cual limita el potencial productivo de los cultivos a pesar del uso de materiales genéticos de alto rendimiento.



La cosecha del cacao es mensual, siguiendo un patrón de recolección relativamente regular, lo que contribuye a mantener un flujo de ingresos para los productores, aunque con niveles de eficiencia y calidad variables. En conjunto, las fincas Tipo 2 representan sistemas productivos con un nivel medio de tecnificación y manejo, con márgenes de mejora importantes en aspectos como la nutrición de cultivos, la frecuencia de prácticas sanitarias, y el uso de registros técnicos para optimizar la productividad y rentabilidad de los sistemas.

La caracterización de las fincas Tipo 2 tiene respaldo en estudios anteriores basados en tipificación de sistemas cacaoteros. Hidalgo et al. (2014) agrupan ese tipo de fincas dentro del Grupo III de su investigación, y las caracterizan como plantaciones monoclonales establecidas principalmente con variedades CCN-51 que, bajo condiciones adecuadas de manejo, pueden superar la media nacional de producción.

Fedecacao (2018) clasifica esas explotaciones como cultivos de tecnología mediana, al alcanzar producciones típicas de 500 a 1.000 kg/ha/año, que resultan consistentes con los rangos observados en esta investigación. No obstante, Cordeagropaz (2015) advierte que aunque estas fincas poseen el potencial técnico para superar los promedios nacionales y regionales, este potencial no se materializa plenamente debido a deficiencias en el manejo agronómico, falta de mantenimiento oportuno y debilidades en las capacidades técnicas de los productores.

Por tanto, las fincas Tipo 2 representan un grupo estratégico para intervenciones de mejora, dado que, con inversiones moderadas en capacitación, asistencia técnica y fortalecimiento organizativo, podrían incrementar significativamente su productividad, rentabilidad y sostenibilidad, acercándose a los niveles de desempeño observados en las fincas de Tipo 1.

Desde el punto de vista de la escala productiva, las fincas Tipo 2 presentan áreas de cultivo que son consideradas adecuadas para la sostenibilidad de los núcleos familiares. Según Fedecacao (2013), un área promedio de 3.3 hectáreas de cacao es suficiente para sostener económicamente a

una familia rural, criterio que es ratificado por el IICA (2001), el cual identifica 3.3 hectáreas como la superficie óptima para mantener la viabilidad económica de una unidad familiar en zonas cacaoteras.

De manera complementaria, CVC-Holanda (1990) reporta que en los núcleos productivos del río Mira, río Caunapí, río Rosario y zonas de carretera en Tumaco, el tamaño de las fincas destinadas al cacao es generalmente menor o igual a 5 hectáreas, en coherencia con las dimensiones observadas en esta tipología.

Así, el tamaño de la finca no constituye en sí mismo una limitante estructural para la sostenibilidad de los sistemas de producción del Tipo 2. El principal desafío reside en la optimización del manejo técnico, la mejora de la eficiencia agronómica y el fortalecimiento de capacidades organizativas, elementos que, de ser abordados adecuadamente, permitirían elevar significativamente los niveles de productividad y la calidad de vida de las familias productoras.

4.5.3 Fincas con Rendimientos Menores a 600 kg/ha (Tipo 3)

Esta tipología agrupa al 85 % de las fincas muestreadas (1.024 unidades productivas), caracterizadas por rendimientos de cacao seco inferiores a 600 kg/ha/año. Las áreas de cultivo oscilan entre 1 y 3 hectáreas, y presentan densidades bajas de plantación, con entre 200 y 400 árboles de cacao por hectárea.

La edad promedio de los cacaotales es de 45 años, aunque se evidencian sistemas de producción envejecidos, con materiales genéticos diversos, pero poco productivos, que incluyen cacao criollo, cacao regional, híbridos espontáneos e hijos de híbridos, con escasa o nula renovación varietal en el tiempo.

En esos sistemas, el cacao está asociado principalmente con musáceas (*Musa sp.*, hasta 500 plantas por hectárea) y frutales diversos, como cítricos (*Citrus x limon*, *Citrus x sinensis*), guabas (*Inga sp.*), zapotes (*Pouteria*



sapota) y guanábanas (*Annona muricata*), con una densidad promedio de 40 árboles frutales por hectárea.

Las prácticas agronómicas observadas en este grupo son deficientes y de baja intensidad: el control de malezas se realiza apenas dos veces al año, el control fitosanitario es sutil y reactivo, al aplicarse solo durante la cosecha, y las podas son escasas o inexistentes, lo que afecta la estructura, sanidad y productividad de las plantas. A ello se suma que la inversión en insumos agrícolas es casi nula, lo que limita en sumo grado las posibilidades de renovación nutricional y fitosanitaria de los cultivos.

Es usual que la cosecha se realice cada 45 días, siguiendo un patrón discontinuo y condicionado por la baja productividad de los árboles. Esas condiciones reflejan sistemas de producción de bajo rendimiento estructural, atrapados en un ciclo de escasa inversión, baja productividad y limitada rentabilidad, que requiere intervenciones integrales y diferenciadas para su revitalización.

La caracterización de las fincas Tipo 3 tiene respaldo en estudios precedentes en sistemas de baja productividad. Hidalgo et al. (2014) identifican un grupo equivalente de fincas clasificado como Grupo II en su tipificación, compuesto principalmente por unidades de producción orgánica, en la que predominan plantaciones híbridas asociadas con CCN-51 que, sin embargo, no superan el rendimiento regional promedio debido a deficiencias estructurales en el manejo agronómico.

De manera complementaria, Fedecacao (2018) señala que esas fincas corresponden a plantaciones de la más baja tecnología, caracterizadas por sistemas viejos, deteriorados y con densidades de árboles muy reducidas, factores que limitan gravemente su capacidad productiva y económica.

Esos antecedentes confirman que las fincas Tipo 3 enfrentan una combinación de limitantes estructurales: edad avanzada de los cultivos, baja densidad de plantación, escasa inversión en prácticas agronómicas que perpetúan un ciclo de baja productividad y rentabilidad, que hacen

imprescindible la implementación de estrategias de renovación tecnológica, asistencia técnica diferenciada y fortalecimiento organizativo para revertir esa situación.

Los hallazgos de esta investigación son consistentes con estudios locales previos. Preciado et al. (2011) reportan que, en fincas tradicionales de Tumaco, la producción de cacao alcanza apenas los 265.7 kg/ha/año, cuando trabajan en gran medida con material criollo de más de 50 años de edad. Esa antigüedad excesiva de los cultivos contribuye sobre manera a la baja productividad, debido a la reducción progresiva del vigor, la resiliencia y el potencial de cosecha de las plantas.

Asimismo, Preciado et al. (2011) señalan una alta incidencia de enfermedades como moniliasis (*Moniliophthora roreri*) y escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*), que afectan tanto la sanidad de las plantas como la calidad y cantidad de la producción. Enfermedades que al no ser controladas de manera oportuna y sistemática, profundizan el deterioro de los sistemas productivos tradicionales, factor que agrava aún más su condición de baja competitividad y sostenibilidad.

Estos resultados refuerzan la necesidad urgente de estrategias integrales de renovación de cacaotales, incluyendo el establecimiento de nuevos materiales genéticos más resistentes, la implementación de programas de control fitosanitario y la adopción de prácticas de manejo agronómico adecuadas para restaurar la productividad y rentabilidad de las fincas Tipo 3.

El análisis de las diferencias entre los tres tipos de fincas identificadas en Tumaco revela que las variables que explican de manera más representativa las brechas de rendimiento y productividad son: a) la densidad de árboles por hectárea, b) el tipo de variedades cultivadas de cacao, c) la edad de los cultivos, d) la práctica de fertilización, e) la frecuencia de los ciclos de cosecha, y f) el tiempo efectivo de dedicación de los productores a las labores agrícolas.

Esos factores permiten comprender por qué algunas fincas logran superar ampliamente los promedios regionales y nacionales, mientras que otras permanecen atrapadas en ciclos de baja productividad y rentabilidad. La variabilidad observada confirma que no solo se trata de diferencias genéticas o climáticas, sino de estrategias de manejo agronómico y organizativo diferenciadas.

Acerca de lo planteado, Espinosa et al. (2015) ratifican que los sistemas productivos de cacao en el Pacífico colombiano responden en la actualidad a dos paradigmas tecnológicos contrastantes: (1) sistemas tradicionales o complejos locales, que integran prácticas agrícolas dentro de un concepto holístico de manejo territorial, y (2) sistemas de explotación comercial moderna, basados en alta densidad de siembra, uso intensivo de insumos químicos y material vegetal clonal de alto rendimiento.

Esa dualidad tecnológica plantea desafíos y oportunidades para el sector cacaotero en Tumaco: mientras los sistemas tradicionales conservan diversidad biológica y prácticas culturales ancestrales, su competitividad es limitada; en cambio, los sistemas modernos, aunque más rentables, presentan riesgos asociados a la sostenibilidad ambiental y social. Entender y gestionar esa diversidad será fundamental para diseñar estrategias de desarrollo rural integrales, diferenciadas y sostenibles.

Datos similares han sido reportados por Peña et al. (2017) en su estudio referidos a sistemas agroforestales de cacao y copoazú en contextos tropicales. Según estos autores, las fincas Tipo I presentan una edad promedio de 10 años y destinan unas 5 hectáreas a la agroforestería, combinando cacao o copoazú con hasta cuatro especies forestales. Las fincas Tipo II tienen una edad promedio de 11.3 años y dedican 8,8 hectáreas, asociadas a cultivos de copoazú, con hasta cinco especies forestales. En contraste, las fincas Tipo III registran edades de 12.3 a 13.6 años, y destinan superficies similares a sistemas agroforestales que combinan copoazú, piña y hasta tres especies forestales.

Estos hallazgos confirman que, de manera progresiva, los sistemas de producción tienden a envejecer, con una reducción en la diversidad funcional y un deterioro gradual de la productividad agrícola. En particular, en las fincas de tipo III, la edad avanzada de los cultivos y la menor diversificación asociada se traducen en sistemas más vulnerables a riesgos fitosanitarios y económicos.

La comparación refuerza la conclusión de que la edad del sistema productivo constituye una variable crítica que incide directamente en el rendimiento, la resiliencia y la sostenibilidad de las explotaciones agrícolas, tanto en cacao como en otros cultivos tropicales asociados. En consecuencia, cualquier estrategia de fortalecimiento del sector debe considerar programas de renovación y rehabilitación de cacaotales envejecidos, previa integración de prácticas agroforestales diversificadas y sostenibles.

Como resultado del análisis, el modelo confirma que el rendimiento por hectárea constituye una variable muy significativa para explicar la productividad total de las fincas cacaoteras en Tumaco. Ello implica que mejoras en el rendimiento tienen un impacto directo y proporcional en la rentabilidad y sostenibilidad de los sistemas de producción.

Una de las estrategias técnicas viables para incrementar el rendimiento es el aumento de la densidad de siembra, lo cual ha sido recomendado por Fedecacao (2013) en su plan de modernización cacaotera. La densificación, acompañada de prácticas de manejo agronómico adecuadas como la selección de materiales de alta productividad, el control fitosanitario riguroso y el manejo de sombra, permitiría optimizar el uso del área disponible y mejorar sustancialmente los niveles de producción por unidad de superficie.

También es importante considerar que cualquier incremento en la densidad debe estar acompañado de programas de capacitación técnica y de fortalecimiento organizativo, para evitar riesgos de sobrepoblación de plantas, competencia intraespecífica o incremento de problemas fitosanitarios por malas prácticas de manejo.

En similar sentido, Pérez (2021) señala que, en el Pacífico colombiano, y particularmente en zonas como Tumaco, la densidad de siembra más utilizada es aproximada a 816 árboles por hectárea, lo cual se adapta a las condiciones ambientales específicas de la región: altos niveles de humedad relativa, elevada pluviometría y baja luminosidad. Esas condiciones limitan la posibilidad de alcanzar densidades mayores sin comprometer la sanidad y el crecimiento de los cultivos.

Esa realidad difiere de las recomendaciones de Fedecacao (2013), que sugiere densidades de hasta 1.000 árboles/ha para optimizar la productividad. No obstante, actualmente solo el 5 % de los productores en el Pacífico maneja densidades de ese nivel, lo cual evidencia una brecha significativa entre el potencial técnico y la práctica real.

Para superar esa brecha, Aguiño (2021) enfatiza la necesidad de fortalecer los programas de asistencia técnica especializada, así como de incrementar las inversiones en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), orientadas a generar y adaptar tecnologías apropiadas para las condiciones ambientales locales. Solo mediante una oferta tecnológica pertinente, acompañada de procesos efectivos de transferencia y adopción, será posible mejorar de manera sostenible los niveles de productividad y la calidad del cacao en regiones como Tumaco, siempre respetando al mismo tiempo las particularidades ecológicas de cada territorio.

4.6 Distribución de Nutrientes en las Fincas Tipo

Una vez identificadas y analizadas las diferencias estructurales entre los tres tipos de fincas de sistemas de producción de cacao, se procedió a realizar análisis de suelos representativos para cada grupo. El objetivo fue caracterizar la distribución de minerales esenciales en el suelo y evaluar el estado nutricional de los sistemas productivos.

Los resultados de los análisis de suelo revelaron que los macronutrientes esenciales (nitrógeno, fósforo, potasio, entre otros) por lo general suelen estar en niveles medio-bajos, lo que refleja deficiencias nutricionales

crónicas en la mayoría de las fincas estudiadas. De igual manera, se detectaron altas concentraciones de hierro (Fe), que podrían generar fenómenos de toxicidad potencial, cuando están en condiciones de drenaje deficiente (Figura 6).

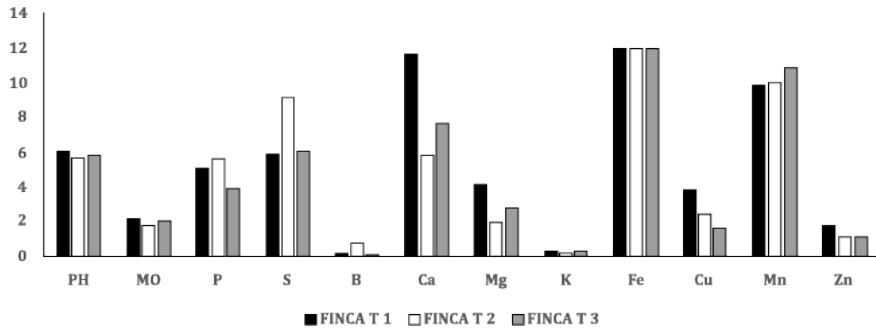


Figura 6. Análisis de nutrientes en las fincas tipos I, II y III
Fuente: Investigación

La Figura 5 ilustra la distribución relativa de los principales parámetros químicos del suelo en los tres tipos de fincas cacaoteras analizadas en Tumaco. El análisis permite cuantificar diferencias y comprender la profunda huella que las dinámicas productivas, ambientales y sociales han dejado sobre la fertilidad de los suelos.

Esos hallazgos concuerdan con observaciones previas de López (2021), quien señala que altos niveles de hierro en suelos tropicales húmedos pueden afectar negativamente la absorción de otros nutrientes esenciales y deteriorar la salud de las plantas de cacao. Del mismo modo, los problemas de drenaje deficiente favorecen la movilización de hierro soluble, aumentando su disponibilidad a niveles tóxicos.

En conjunto, el estado nutricional de los suelos analizados sugiere una limitante significativa para la productividad de los sistemas de producción tradicionales de cacao en Tumaco, lo que recalca la necesidad de diseñar programas específicos de manejo y rehabilitación de suelos, adaptados a las condiciones edafoclimáticas locales.



De manera general, el pH registrado en todas las fincas se mantiene dentro de un rango levemente ácido, condición natural de los suelos tropicales húmedos, adecuada para el cultivo de cacao, pero que puede amplificar ciertos desequilibrios en la disponibilidad de nutrientes si ellos no son intervenidos adecuadamente.

La materia orgánica (MO), esencial para la retención de agua y nutrientes, presenta niveles bajos en las tres tipologías de finca. Esa carencia refleja la ausencia de prácticas sistemáticas de manejo orgánico y deja entrever una limitada capacidad de resiliencia de los suelos ante condiciones de estrés hídrico o nutricional. La baja MO constituye una alerta estructural para la sostenibilidad a largo plazo de esos sistemas.

Respecto a los macronutrientes primarios, los contenidos de fósforo (P) y azufre (S) son notoriamente medios a bajos, hecho que limita el crecimiento radicular y afecta la formación de proteínas esenciales para la fisiología del cacao. Aunque las fincas Tipo 1 evidencian niveles ligeramente superiores, las diferencias no son tan significativas como para contrarrestar la tendencia general de deficiencia.

En cambio, una diferencia sustantiva se observa en el contenido de calcio (Ca): las fincas Tipo 1 presentan mayores niveles, hecho que pudiera explicar parcialmente su mejor desempeño productivo, dada la función del calcio en la estabilidad estructural de las plantas y en la división celular. El magnesio (Mg), cofactor indispensable en la fotosíntesis, también muestra niveles medios, aunque disminuye progresivamente de Tipo 1 a Tipo 3.

El potasio (K) elemento crítico para el llenado de frutos y la resistencia a enfermedades se encuentra en niveles bajos a muy bajos en todas las tipologías, lo cual compromete en alto grado la calidad y el volumen de las cosechas. Ese déficit se convierte en uno de los cuellos de botella agrónomos más evidentes.

Entre tanto, especial preocupación genera la elevada concentración de hierro (Fe) en los suelos de las tres tipologías, condición que, como advierte López (2021), puede generar toxicidad latente, más aún en suelos

con deficiencias de drenaje como los que predominan en Tumaco. Esa saturación de hierro, aunque enmascarada bajo la abundancia, bloquea la absorción de otros nutrientes esenciales y contribuye en silencio al deterioro productivo de los sistemas.

Por último, los micronutrientes –cobre (Cu), manganeso (Mn) y zinc (Zn)– presentan niveles bajos a críticos, lo que afecta procesos enzimáticos fundamentales para la defensa fitosanitaria y el metabolismo de las plantas. La deficiencia combinada de esos elementos deja en evidencia un cuadro de desnutrición múltiple que afecta la vitalidad general del cacao.

En su conjunto, los datos reflejan que los sistemas tradicionales de producción de cacao en Tumaco operan sobre suelos empobrecidos, desbalanceados y en algunos casos tóxicos, lo que constituye una limitante severa para su sostenibilidad y competitividad. A partir de esa certeza, se reafirma la necesidad de implementar estrategias de rehabilitación edáfica integral, ajustadas a las condiciones locales, que incorporen manejo orgánico, correcciones nutricionales específicas y prácticas agronómicas regenerativas.

4.7 Interpretación Cuadro Indicativo de Nutrientes en Suelo para Cacao

Con base en los cuadros de referencia nutricional establecidos por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2017), se evaluó la fertilidad de los suelos de las fincas Tipo I en Tumaco. Los resultados muestran que esos sistemas presentan una fertilidad general media, caracterizada por un contenido bajo de fósforo (P), azufre (S) y boro (B), elementos fundamentales para el desarrollo radicular, la resistencia a enfermedades y la formación de tejidos vegetales.

El pH del suelo se sitúa en rangos poco ácidos, condición agronómicamente aceptable para el cultivo de cacao, mientras que el contenido de materia orgánica es clasificado como medio, lo que ofrece cierto soporte a la estructura y dinámica biológica del suelo, aunque insuficiente para una producción de alta competitividad (Figura 7).

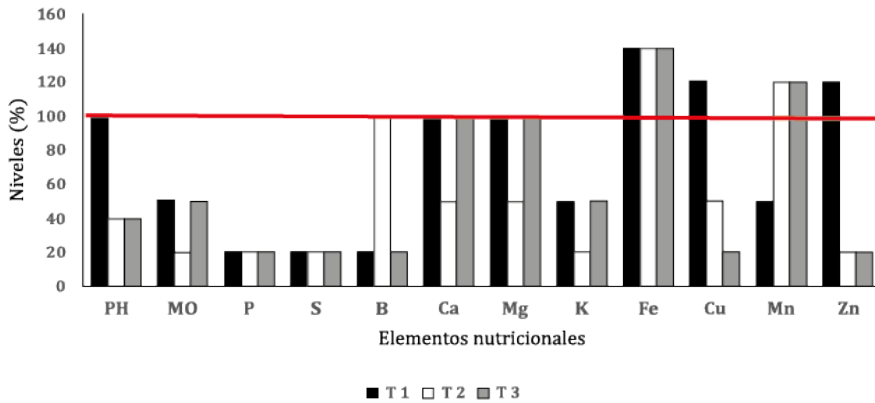


Figura 7. Elementos nutricionales de las fincas tipo I, II y III

Fuente: Investigación

Cabe destacar que en este grupo de fincas los productores realizan prácticas básicas de fertilización edáfica, aplicando al menos una vez al año fertilizantes de formulaciones comerciales como NPK triple 15 o fertilizantes cafeteros 17-6-18-2, que aportan 17 % de nitrógeno (N), 6 % de fósforo (P), 18 % de potasio (K); además de magnesio (Mg), azufre (S), boro (B) y zinc (Zn) en proporciones menores. Esas aplicaciones realizadas en dosis de 250 a 350 gramos por planta, han permitido mantener un nivel nutricional funcional, que evita la degradación acelerada de la fertilidad del suelo.

Igual, se observa de manera preocupante un alto contenido de hierro (Fe) en los suelos de las fincas Tipo I. Esta concentración elevada se atribuye a problemas de encharcamiento, resultado de deficiencias estructurales de drenaje y de la topografía plana o deprimida de muchas áreas de cultivo. Aunque algunos productores han implementado drenajes internos incipientes, su cobertura es aún limitada, lo que no logra revertir por completo el efecto negativo del exceso de hierro sobre la disponibilidad de otros nutrientes esenciales.

Esos resultados reflejan que, aunque las fincas Tipo I presentan mejores condiciones relativas en comparación con los otros tipos de finca analizados, la producción de cacao en Tumaco continúa siendo marginal,

afectada por limitantes nutricionales múltiples, deficiencias edáficas y problemas estructurales de manejo agronómico y ambiental (López, 2021; Fedecacao, 2015).

El análisis de suelos para las fincas clasificadas como Tipo II revela un nivel medio de fertilidad general, aunque acompañado de limitaciones nutricionales específicas que condicionan su desempeño productivo (Figura 6). De acuerdo con los parámetros de referencia del ICA (2017), esos suelos presentan contenidos bajos de fósforo (P), azufre (S), potasio (K) y zinc (Zn), nutrientes esenciales para el desarrollo radicular, la formación de estructuras de resistencia y la calidad del grano de cacao.

Aunque el contenido de boro (B), cobre (Cu) y manganeso (Mn) muestra niveles más contrastantes en algunos de ellos dentro de rangos aceptables, sus nutrientes secundarios no logran compensar las deficiencias críticas de los macronutrientes primarios. Asimismo, el suelo presenta un pH moderadamente ácido y un contenido bajo de materia orgánica, lo que limita la capacidad del sistema edáfico para mantener reservas estables de nutrientes y su disponibilidad para las plantas.

Un aspecto que merece especial atención es la presencia elevada de hierro (Fe) en los suelos, fenómeno exacerbado por las condiciones de encharcamiento frecuente observadas en esas fincas. La falta de infraestructura adecuada de drenaje, combinada con la ausencia de mantenimiento en los sistemas existentes, favorece procesos de anoxia en el suelo, lo que moviliza el hierro soluble a niveles potencialmente tóxicos para las plantas.

En cuanto a las prácticas de fertilización, los productores de las fincas Tipo II realizan aplicaciones esporádicas y dispersas de fertilizantes de tipo triple 15 (15-15-15), en dosis bajas que resultan insuficientes para corregir las deficiencias nutricionales detectadas. Una fertilización limitada y no planificada impide lograr balances positivos de nutrientes y deja al sistema productivo vulnerable frente a factores de estrés biótico y abiótico.



En conjunto, la evidencia indica que las fincas Tipo II, aunque mejor posicionadas que las Tipo III en términos relativos, no logran consolidar sistemas de manejo de suelos eficaces, lo que condiciona su capacidad de mejora productiva y amenaza su sostenibilidad a mediano plazo. La rehabilitación de dichos sistemas exige intervenciones integrales, que incluyen planes de manejo edáfico específicos, fortalecimiento de la asistencia técnica y acciones urgentes para mejorar las condiciones de drenaje.

El análisis de suelos realizado en las fincas clasificadas como Tipo III revela un estado de fertilidad muy limitado, lo que afecta de manera directa la productividad y sostenibilidad de esos sistemas de producción de cacao (Figura 6). Según los estándares de referencia del ICA (2017), se identificaron niveles bajos de fósforo (P), azufre (S), boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn), nutrientes esenciales para la formación de tejidos, la defensa vegetal y la producción de frutos.

A pesar de ello, se observaron niveles con relativa favorabilidad de calcio (Ca), magnesio (Mg) y manganeso (Mn), junto a un contenido medio a bueno de materia orgánica en los suelos. Esa combinación sugiere que, a pesar de las severas limitaciones nutricionales, los procesos de descomposición natural de biomasa proveniente de especies forestales y frutales asociadas han contribuido de manera pasiva al mantenimiento parcial de algunas propiedades edáficas.

El pH moderadamente ácido registrado en esas fincas resulta adecuado para el cultivo de cacao en teoría; aunque su efecto positivo se ve ampliamente contrarrestado por la presencia elevada de hierro (Fe) en el suelo. La alta concentración de hierro, en combinación con problemas generalizados de drenaje, incrementa el riesgo de toxicidad y bloquea la disponibilidad de otros nutrientes esenciales.

Un aspecto crítico que caracteriza a las fincas Tipo III es la ausencia total de prácticas de fertilización, tanto química como orgánica. Los agricultores no realizan ninguna estrategia de aporte de nutrientes suplementarios, lo que, a largo plazo, profundiza los procesos de degradación del

suelo y agrava la baja productividad observada. Ese vacío de manejo nutricional evidencia limitaciones económicas y barreras estructurales de acceso a tecnología, información y servicios de asistencia técnica.

En conjunto, las fincas Tipo III reflejan sistemas de producción altamente vulnerables, atrapados en un ciclo de baja productividad, deterioro edáfico y exclusión tecnológica. Su recuperación demandaría intervenciones profundas y sostenidas, que combinen rehabilitación de suelos, transferencia tecnológica adaptada y fortalecimiento organizativo de base.

Al estado nutricional crítico evidenciado en las fincas Tipo III, se suman las condiciones físicas de ubicación y acceso imponen restricciones adicionales que agravan la precariedad de esos sistemas productivos. Esas fincas están ubicadas en zonas de colinas moderadas, con pendientes que oscilan entre 10 % y 15 %, y a distancias considerables de los centros poblados, lo cual incrementa sobre manera los costos logísticos de operación.

La pendiente del terreno genera un fenómeno adicional de alta relevancia: en caso de realizarse fertilización edáfica convencional, se estima que hasta un 60 % de los insumos aplicados podrían perderse por escorrentía superficial, ello disminuye de forma relevante la eficiencia de la fertilización y comprometiendo la rentabilidad de cualquier inversión en insumos agrícolas. Ese riesgo de lavado de nutrientes afecta la eficiencia técnica de la fertilización y puede contribuir a procesos de degradación ambiental, como la eutrofización de cuerpos de agua cercanos.

La falta de infraestructura vial adecuada, caracterizada por la inexistencia de vías terciarias en buen estado y la dependencia de caminos de herradura o transporte fluvial limitado, impide realizar labores de mantenimiento, cosecha y poscosecha de manera oportuna. Situación que limita la frecuencia y calidad de las intervenciones agronómicas necesarias para sostener o mejorar la productividad de los cacaotales.

Ese tipo de factores estructurales actúan como tensores socioeconómicos que desincentivan a los agricultores a invertir tiempo, recursos y esfuerzo en el manejo técnico del cacao. En consecuencia, muchos productores



limitan su participación activa al mero aprovechamiento oportunista de las cosechas, recolectando mazorcas y otros productos asociados solo cuando las condiciones lo permiten, sin realizar prácticas de manejo agronómico sistemático. Esa lógica de extracción puntual y bajo compromiso productivo refuerza el ciclo de insostenibilidad que caracteriza a las fincas tipo III.

Los resultados obtenidos a partir de los análisis de suelos realizados en las fincas cacaoteras de Tumaco permiten establecer un diagnóstico claro: los sistemas productivos de cacao enfrentan una deficiencia nutricional estructural, que limita en extremo su potencial de productividad y sostenibilidad.

Esa deficiencia responde en gran medida a la ausencia de planes de fertilización sistemáticos, así como a la falta de acceso a insumos agrícolas adecuados por parte de las familias productoras. La fertilización, cuando existe, se realiza de manera esporádica, dispersa o en dosis insuficientes, incapaces de revertir la tendencia hacia niveles bajos de nutrientes esenciales en el suelo. Como consecuencia, los suelos muestran un patrón persistente de empobrecimiento, caracterizado por déficits de macronutrientes como fósforo (P), potasio (K) y azufre (S), y micronutrientes críticos como boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn).

A la dificultad nutricional se suma un problema físico de gran envergadura: la falta generalizada de drenajes internos adecuados en las fincas. Deficiencia que en la infraestructura de manejo hídrico provoca altos niveles de encharcamiento, afecta negativamente el desarrollo radicular de las plantas, y permite la movilización excesiva de hierro (Fe) en el suelo.

Tal como advierte López (2021), la combinación de suelos saturados de agua y altos contenidos de hierro puede desencadenar procesos de toxicidad edáfica, que afectan la absorción de nutrientes por parte del cacao y deterioran la vitalidad general de las plantas. De esa manera, el encharcamiento actúa como un tensionador adicional, que exagera los problemas nutricionales y disminuye aún más el rendimiento potencial de los cacaotales.

En conjunto, los resultados reflejan que la productividad limitada del cacao en Tumaco no solo se deriva del efecto de prácticas agrícolas aisladas, sino que responde a una interacción compleja entre factores edáficos, agronómicos y socioeconómicos, que requiere de intervenciones integrales, diferenciadas y sostenibles para ser superada.

La clasificación de los elementos nutricionales esenciales para las plantas se realiza de acuerdo con la cantidad requerida por la especie cultivada, distinguiéndose en tres categorías principales: nutrientes mayores, nutrientes secundarios y nutrientes menores o micronutrientes (Mejía et al., 2000). Esa categorización no implica diferencias en su importancia funcional, porque todos los minerales son igualmente esenciales para completar el ciclo vital de las plantas, aunque se requieran en proporciones distintas.

Cada nutriente cumple funciones específicas e irremplazables en el metabolismo vegetal, desde la síntesis de tejidos estructurales, el funcionamiento enzimático, la regulación osmótica, hasta la formación de compuestos de defensa. Para que un programa de nutrición eficiente sea exitoso, los elementos deben estar disponibles en el suelo en formas asimilables por las raíces, y sus concentraciones deben ser adecuadas a las distintas fases del desarrollo fenológico de las plantas.

En particular, los nutrientes vinculados directamente al metabolismo primario –como el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y magnesio (Mg)– tienden a presentarse en mayores concentraciones durante las etapas iniciales de la formación, crecimiento y producción de biomasa (Navarro y Navarro, 2003). Estas etapas críticas demandan un suministro constante y equilibrado de nutrientes, cuya deficiencia, como se ha evidenciado en los sistemas tradicionales de cacao en Tumaco, puede limitar en extremo el desarrollo vegetativo, la calidad de la producción y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

La correcta comprensión de la clasificación, funciones y dinámicas de los nutrientes minerales constituye así un pilar fundamental para el diseño de estrategias de manejo nutricional orientadas a restaurar la fertilidad



de los suelos, incrementar la productividad de los cultivos y asegurar la resiliencia de los sistemas agroforestales tradicionales de cacao en contextos tropicales como el de Tumaco.

Uribe et al. (1998) destacan que, en Colombia, la investigación relacionada con la fertilización edáfica y foliar del cacao es limitada, tanto en cantidad como en profundidad. Existe poca información técnica validada sobre aspectos fundamentales como los requerimientos nutricionales específicos del cultivo, las dosis óptimas de fertilizantes, las épocas de aplicación más adecuadas, o la influencia de factores como la edad del cultivo y el nivel de sombrero sobre la respuesta del cacao a las prácticas de fertilización.

La brecha de conocimiento limita la capacidad de diseñar programas de fertilización ajustados a las condiciones locales, y obliga a extrapolar prácticas de manejo desarrolladas en otros contextos agroecológicos, a menudo sin la validación empírica necesaria para garantizar su efectividad en regiones como Tumaco.

Estudios realizados en Brasil refuerzan la importancia de contextualizar las prácticas de fertilización. La evidencia muestra que, en sistemas de cacao bajo sombra, la fertilización produce incrementos modestos en la productividad; en contraste, en cultivos a pleno sol, los incrementos de rendimiento derivados de la fertilización son considerablemente mayores. Este fenómeno puede explicarse por las diferencias en la disponibilidad de luz, la tasa de fotosíntesis y la dinámica de competencia por nutrientes entre el cacao y las especies de sombrero.

Para los sistemas tradicionales de Tumaco, caracterizados por una fuerte integración agroforestal, estas observaciones subrayan la necesidad de diseñar estrategias de nutrición diferenciadas, que consideren tanto los requerimientos fisiológicos del cacao como las interacciones complejas con el dosel de sombra y las condiciones edafoclimáticas particulares.

Cerrar la brecha de la investigación nacional en fertilización del cacao es, por tanto, un paso crítico para lograr sistemas de producción más sostenibles, productivos y resilientes en las regiones cacaoteras colombianas.

En Colombia, el cultivo de cacao se desarrolla sobre suelos que presentan amplias variaciones en su nivel de fertilidad, lo que influye de manera decisiva en la productividad de los sistemas cacaoteros. Dentro de ese contexto, las características químicas del suelo –particularmente el equilibrio y la disponibilidad de nutrientes– juegan un papel crítico en el establecimiento de un balance nutricional adecuado y, por ende, en la posibilidad de alcanzar rendimientos satisfactorios (Sousa et al., 1999).

El cacao es un cultivo exigente en términos nutricionales, sobre todo a partir del inicio de la fase de producción comercial. Según lineamientos de la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao, 2015), para lograr productividades superiores a 1.000 kg de cacao seco por hectárea por año, se requiere que el sistema de manejo agronómico asegure el suministro de nutrientes esenciales en las siguientes cantidades aproximadas por hectárea a partir del cuarto año de establecimiento:

- Potasio (K): 633 kg/ha/año
- Fósforo (P): 48 kg/ha/año
- Nitrógeno (N): 438 kg/ha/año
- Calcio (Ca): 373 kg/ha/año
- Magnesio (Mg): 129 kg/ha/año
- Manganeso (Mn): 6 kg/ha/año
- Zinc (Zn): 1.5 kg/ha/año

Esos requerimientos reflejan la importancia del potasio y el nitrógeno como nutrientes primarios para el desarrollo vegetativo y la producción de frutos, así como del calcio y el magnesio en la regulación de la estructura celular y la fotosíntesis. La presencia en menores cantidades de elementos como manganeso y zinc también es esencial para mantener procesos metabólicos clave, fortalecer mecanismos de defensa vegetal y asegurar la calidad del grano.

No lograr esos niveles de nutrición, o no ajustar el manejo edáfico para suplirlos oportunamente, equivale inevitablemente a sistemas de baja productividad, baja calidad de grano y vulnerabilidad frente a factores



bióticos y abióticos. No obstante, se debe tener en cuenta la “Ley del mínimo” la cual indica que “El crecimiento de una planta está limitado por el nutriente esencial que se encuentra en menor cantidad o que es más deficiente, incluso si otros nutrientes están disponibles en abundancia.” (von Liebig, 1840). En consecuencia, diseñar programas de fertilización específicos y adaptados a las condiciones locales, como los suelos cacaoteros de Tumaco, es una necesidad imperativa para transitar hacia sistemas con mayor sostenibilidad y competitividad.

4.8 Descripción de los Minerales Encontrados en los Tipos de Fincas

4.8.1 pH del Suelo en Fincas de Cacao

Los análisis de suelos realizados en los distintos tipos de fincas cacaoteras de Tumaco revelaron que, en general, los suelos presentan un pH moderadamente ácido, condición que resulta crítica para el comportamiento agronómico del cacao. De acuerdo con Harvey et al. (2002), el cacao (*Theobroma cacao* L.) produce mejor en suelos ligeramente ácidos, con valores óptimos de pH entre 6.4 y 6.6. En ese rango, la disponibilidad de nutrientes esenciales es máxima, mientras que la presencia de elementos tóxicos, como el aluminio, se mantiene en niveles mínimos.

Sembrar cacao en suelos con pH inferiores a 5.5 o superiores a 7.0 compromete tanto el crecimiento vegetativo como la productividad, debido a alteraciones en la disponibilidad de nutrientes, inhibición de procesos metabólicos y mayor susceptibilidad a enfermedades (Harvey et al., 2002). En el caso de Tumaco, la mayoría de los valores registrados oscilaron entre 5.5 y 6.6, lo que indica una compatibilidad aceptable con las necesidades fisiológicas del cultivo.

El patrón observado es consistente con los datos obtenidos en muestreos nacionales anteriores. León et al. (2019) reportaron en su estudio que, en sistemas tradicionales de cacao en Colombia, el pH máximo alcanzado fue de 6.6 y la media se situó en 5.5, valores que coinciden estrechamente con los hallazgos en Tumaco. Esa coincidencia fortalece la validez y comparabilidad

del set de datos local, al otorgar solidez a los análisis posteriores de tipificación de sistemas productivos.

Aunque el rango de pH es aceptable en términos generales, su tendencia hacia valores moderadamente ácidos sugiere la necesidad de estrategias de monitoreo y corrección periódica, ante todo, en fincas donde otras limitaciones edáficas (como baja fertilidad y encharcamiento) agravan la vulnerabilidad del sistema productivo.

En suelos cuyo pH es inferior a 5.5, las condiciones de acidez elevada generan un ambiente edáfico altamente restrictivo para el desarrollo adecuado del cacao. Esta alta acidez se traduce en concentraciones tóxicas de aluminio (Al^{3+}) y manganeso (Mn^{2+}) en la solución del suelo, elementos que afectan de manera directa la arquitectura radicular y la capacidad de absorción de nutrientes esenciales (Murray, 2014).

La toxicidad por aluminio, en particular, provoca inhibición del crecimiento de las raíces, alteraciones en su morfología y reducción de la superficie de absorción. Ello impide la captación eficiente de elementos vitales como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), nutrientes indispensables para la fotosíntesis, el crecimiento vegetativo y la formación de frutos de calidad. De igual forma, la toxicidad por manganeso puede intensificar el estrés oxidativo en las plantas, comprometiendo aún más su desempeño fisiológico y productivo.

Ante esa problemática, una estrategia sostenible para neutralizar la acidez y mejorar las condiciones nutricionales del suelo consiste en la aplicación de abonos orgánicos enriquecidos con microorganismos eficientes. Según la Fundación Suyusama (2021), una práctica recomendada es la elaboración de biofertilizantes utilizando materiales locales como mantillo de suelo forestal, harina de roca, leche y estiércol de ganado. Esos insumos aportan materia orgánica y nutrientes, y también activan comunidades microbianas benéficas que promueven la descomposición de materia orgánica, mejoran la estructura del suelo, elevan su capacidad de intercambio catiónico y contribuyen a la estabilización del pH hacia valores más compatibles con las necesidades del cacao.



La incorporación sistemática de estrategias de manejo orgánico y biológico representa, por tanto, una oportunidad estratégica para rehabilitar suelos degradados, fortalecer la resiliencia productiva de los sistemas de cacao tradicional en Tumaco y avanzar hacia una producción más sostenible y competitiva.

4.8.2 Materia Orgánica (MO)

Los análisis de suelo realizados en las fincas cacaoteras de Tumaco muestran que el contenido de materia orgánica (MO) se sitúa, en general, en niveles medios. Aunque sus niveles permiten un funcionamiento básico de los sistemas productivos, la consolidación de prácticas sostenibles y de alta productividad requiere avanzar hacia contenidos de MO más elevados, que favorezcan la estructura, la retención de humedad, el intercambio de nutrientes y la resiliencia del suelo.

La materia orgánica es fundamental en los agroecosistemas porque actúa como reservorio de nutrientes, mejora la porosidad y la aireación del suelo, promueve la actividad biológica y amortigua las fluctuaciones del pH. Su aumento constituye, por tanto, una estrategia clave para rehabilitar suelos tropicales degradados y mejorar la eficiencia de los sistemas de producción de cacao.

La Fundación Suyusama (2021) sugiere que uno de los caminos más efectivos para elevar los niveles de MO es la aplicación de abonos orgánicos enriquecidos con harina de roca, valorada por su diversidad mineral y su capacidad de remineralizar el suelo. Cuando los abonos se aplican en conjunto con microorganismos eficientes (ME), potencian aún más su efecto, activan el microbiota del suelo, aceleran los procesos de mineralización de nutrientes y promueven un equilibrio biológico favorable para el cultivo.

Registros históricos muestran que el uso de residuos orgánicos como abono ha demostrado efectos positivos indiscutibles sobre la agricultura. Navarro et al. (1995) documentan cómo, en distintos contextos productivos, la reincorporación de materia orgánica al suelo mediante residuos

agrícolas resultó en incrementos sustantivos de los rendimientos y en la mejora integral de la calidad del suelo.

En consecuencia, la intensificación de prácticas de manejo orgánico y biológico en los sistemas cacaoteros de Tumaco constituye una respuesta a las limitaciones de fertilidad observadas y una vía estratégica para fortalecer la sostenibilidad, la productividad y la resiliencia de esos agroecosistemas frente a los desafíos ambientales y socioeconómicos.

4.8.3 Fósforo (P): Limitaciones y oportunidades en el Pacífico Nariñense

Los resultados de los análisis de suelos realizados en las fincas cacaoteras de Tumaco muestran niveles bajos de fósforo (P), una situación que plantea limitaciones importantes para el desarrollo adecuado del cultivo. El fósforo es considerado un nutriente primario debido a su rol esencial en numerosos procesos fisiológicos de las plantas, y a su alta demanda relativa en comparación con otros elementos menores (Montecino, 2014).

En suelos tropicales, como los de Tumaco, las deficiencias de fósforo son comunes debido a factores como la elevada fijación por óxidos de hierro y aluminio, la acidez edáfica y las altas tasas de lixiviación, condiciones que reducen la fracción de fósforo disponible para las plantas y limitan su absorción efectiva.

Cuando existe deficiencia de fósforo en el suelo, las plantas exhiben síntomas característicos que reflejan el impacto en su metabolismo. De acuerdo con el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 1992), los síntomas más evidentes incluyen: crecimiento lento, desarrollo limitado de hojas pequeñas, sistemas radiculares cortos y poco profundos, y decoloración pálida en los márgenes y puntas de las hojas maduras. Asimismo, las hojas jóvenes pueden tornarse más claras que las venas, evidencia de un patrón típico de clorosis marginal.



La deficiencia de fósforo afecta en especial procesos fundamentales como la división celular, la expansión radicular, la acumulación de reservas energéticas (ATP) y la floración y fructificación, etapas críticas en el ciclo de vida del cacao. En consecuencia, su carencia limita tanto el crecimiento vegetativo como el potencial productivo de las plantaciones.

Abordar la limitante de fósforo en los sistemas de cacao tradicionales de Tumaco exige estrategias de manejo diferenciadas, incluyendo la aplicación dirigida de fuentes fosfatadas solubles, el uso de biofertilizantes fosfáticos y el mejoramiento de la materia orgánica del suelo, que puede actuar como *buffer* para estabilizar la disponibilidad de fósforo en el tiempo.

Además de su limitada concentración en los suelos tropicales, el fósforo (P) enfrenta otros desafíos relacionados con su disponibilidad real para las plantas. Como señala Vivar (2013), cuando la deficiencia de fósforo se intensifica, se manifiestan síntomas más severos en el follaje, tales como manchas necróticas en el ápice de las hojas, acompañadas de un color verde oscuro inusual en el resto del limbo foliar. Esos signos reflejan alteraciones metabólicas profundas, asociadas a deficiencias en la síntesis de compuestos energéticos y disfunciones en el transporte de azúcares y nutrientes.

Un aspecto crucial que debe considerarse es que la presencia de fósforo en el suelo no garantiza su disponibilidad para el cultivo. De acuerdo con el Instituto Latinoamericano de Fosfatos (Inpofos, 1997), varios nutrientes esenciales, incluido el fósforo, pueden encontrarse en formas químicas poco solubles o no disponibles para la absorción radicular. Ese fenómeno ocurre, por ejemplo, cuando el fósforo queda fijado en complejos insolubles de hierro, aluminio o calcio, dependiendo del pH y del contenido de sales del suelo.

Ello se acentúa en condiciones de salinidad elevada o alcalinidad del suelo, intensifica los procesos de bloqueo químico y reduce la fracción de fósforo disponible para las raíces. Asimismo, interacciones negativas con otros minerales pueden inhibir la absorción de fósforo y potasio, agravando las deficiencias nutricionales a pesar de la presencia aparente de esos nutrientes en el perfil edáfico.

Para los sistemas cacaoteros de Tumaco, esta realidad implica que las estrategias de corrección de deficiencias de fósforo deben ir más allá de la simple adición de fertilizantes fosfatados, incluyendo prácticas que mejoren las condiciones fisicoquímicas del suelo, como el ajuste de pH, la incorporación de materia orgánica y el control de sales, para optimizar la biodisponibilidad de los nutrientes críticos. En suelos tropicales, el aluminio y el hierro forman compuestos insolubles con fósforo, reduciendo su disponibilidad. La aplicación de cal y materia orgánica mitiga este problema al estabilizar el aluminio en formas no tóxicas.

La biodisponibilidad del fósforo en suelos tropicales ácidos, como los de Tumaco, está muy influenciada por los procesos de adsorción y solubilización que ocurren en la matriz edáfica. Según Montecino (2014), un gran número de ácidos orgánicos naturales tienen la capacidad de solubilizar fosfatos, liberándolos de complejos insolubles y dejándolos en formas disponibles para la absorción por las plantas.

En suelos con alta acidez, la capacidad de adsorción del fósforo está determinada casi siempre por la presencia de óxidos hidratados de hierro y aluminio, así como por el contenido de aluminio intercambiable. Esos compuestos tienden a fijar el fósforo y reducen su disponibilidad. Sin embargo, la acción de ácidos orgánicos (como ácidos cítrico, málico o oxálico, liberados por microorganismos o descomposición de residuos) puede desbloquear parte del fósforo adsorbido, con lo cual aumentan su solubilidad en la solución del suelo.

Este mecanismo sugiere que el uso de fuentes orgánicas es una estrategia viable para mejorar la nutrición fosfatada en sistemas de producción de cacao. Según Intagris (2020), la incorporación de residuos de cosecha, aplicaciones de estiércol de ganado o de gallina, y el mejoramiento general de la materia orgánica del suelo pueden contribuir significativamente al enriquecimiento de la solución del suelo en fósforo disponible. Esas prácticas, no solo son más sostenibles ambientalmente, sino que potencian la actividad microbiana beneficiosa y promueven ciclos de nutrientes más dinámicos y resilientes.

En el contexto de Tumaco, donde los análisis muestran deficiencias de fósforo combinadas con suelos ácidos y elevados contenidos de hierro, el manejo integrado de materia orgánica se presenta como una herramienta clave para corregir limitaciones nutricionales, mejorar la productividad de los sistemas de cacao tradicionales y avanzar hacia modelos de producción agroecológica más competitivos

4.8.4 Azufre (S)

Los análisis de suelos realizados en las fincas de cacao de Tumaco revelaron niveles bajos de azufre (S), una condición que afecta de manera significativa la eficiencia fisiológica de los sistemas de producción. El azufre es un nutriente esencial para las plantas, involucrado en funciones clave como la síntesis de proteínas, enzimas y cofactores, así como en el desarrollo de pigmentos fotosintéticos y compuestos defensivos.

Los síntomas de deficiencia de azufre son, a menudo, difíciles de distinguir y pueden ser confundidos con carencias de nitrógeno. Acerca de ello, Brady (2002), señala que los primeros signos de insuficiencia se manifiestan en las hojas más jóvenes, las cuales desarrollan un color amarillento brillante que incluye también las nervaduras, a diferencia de la clorosis por nitrógeno, que inicia en hojas viejas. En fases más avanzadas, se observan parches amarillentos pálidos en las hojas maduras, sin una reducción marcada en su tamaño.

La carencia de azufre compromete directamente la capacidad fotosintética de la planta, dado que limita la formación de clorofila y proteínas estructurales. Como advierte Clavijo (1989), una baja disponibilidad de azufre reduce el área foliar funcional, lo cual disminuye la captación de luz solar necesaria para mantener tasas adecuadas de fotosíntesis y, por ende, afecta negativamente el crecimiento, el desarrollo fisiológico y la productividad del cultivo.

La deficiencia en los sistemas de Tumaco se combina con otras limitaciones edáficas identificadas (baja disponibilidad de fósforo y potasio, alta acidez), precisa la necesidad de estrategias integrales de manejo nutricional.

El diseño de programas de fertilización adaptados a las condiciones locales debería incluir aportes específicos de azufre, preferiblemente mediante fuentes balanceadas o en combinación con correctores orgánicos, para potenciar la recuperación de la funcionalidad fisiológica de las plantaciones.

La deficiencia de azufre (S) en plantas de cacao se manifiesta en un comienzo en las hojas jóvenes, las cuales adquieren un color pálido característico y muestran escaso desarrollo morfológico. Según Mosquera (2017), uno de los signos distintivos es que las nervaduras de las hojas presentan una tonalidad aún más pálida que los limbos y reflejan alteraciones profundas en el metabolismo nitrogenado y la síntesis de pigmentos.

Desde un punto de vista bioquímico, la insuficiencia de azufre reduce la síntesis de aminoácidos esenciales como la cisteína y la metionina, lo cual impacta negativamente en la formación de proteínas estructurales y funcionales; en consecuencia, disminuye la producción de clorofila, el principal pigmento fotosintético. Esa limitación metabólica repercute de manera directa en la eficiencia fotosintética y el crecimiento vegetativo del cultivo.

Por su parte, Mejía (2000) expone que durante la expansión celular en el desarrollo foliar se produce un fenómeno conocido como efecto de dilución: a medida que se incrementa el volumen de material de la pared celular, la concentración de nutrientes esenciales disminuye, exacerbando los síntomas de deficiencia si las reservas disponibles son limitadas. Ese efecto, sumado a la reabsorción de nutrientes durante la senescencia de las hojas más viejas, agrava la escasez de elementos clave como el azufre en los tejidos en crecimiento.

Por ende, en sistemas de cacao tradicionales como los de Tumaco, donde los niveles de azufre en el suelo son bajos y las prácticas de manejo nutricional son limitadas, los síntomas descritos representan una alerta crítica. Su identificación temprana puede permitir intervenciones agronómicas oportunas, que mejoran la salud del cultivo y la productividad a largo plazo.



Frente a los bajos niveles de azufre (S) detectados en los suelos cacaoteros de Tumaco es indispensable implementar estrategias de remediación nutricional adaptadas a las condiciones locales. La Fundación Suyusama (2021) sugiere el uso de fuentes de sulfatos, tales como sulfato de amonio, sulfato de potasio o yeso agrícola, como una vía efectiva para mejorar la disponibilidad de azufre en suelos deficientes, y así restablecer el equilibrio nutricional de los sistemas productivos.

Si bien la incorporación de residuos de cultivos y abonos orgánicos puede contribuir a la reposición parcial del azufre extraído durante la cosecha, esas fuentes presentan una limitación importante: principalmente reciclan el azufre ya presente en el agroecosistema y no introducen cantidades significativas adicionales del elemento. Así, en regiones donde los suelos presentan una pobreza estructural en azufre, la dependencia de la aplicación externa de fertilizantes azufrados se vuelve inevitable (Sanzano, 2019).

Para mantener un nivel de productividad sostenible en cultivos de cacao es necesario programar aplicaciones regulares de materiales que contengan azufre, como parte integral del plan de fertilización. Esas prácticas permiten corregir las deficiencias crónicas del suelo, mejorar la síntesis de proteínas y la eficiencia fotosintética de las plantas, y, en última instancia, potenciar el crecimiento, la resistencia y la producción de cacao de calidad.

En síntesis, el enfoque hacia la corrección de la deficiencia de azufre en Tumaco debe ser multiestratificado, combinando mecanismos de reciclaje biológico (a través de la materia orgánica) con aportes externos planificados de fuentes minerales, con criterios técnicos que optimicen la eficiencia de las aplicaciones y minimicen impactos ambientales negativos.

4.8.5 Boro (B)

El boro (B) es un micronutriente esencial para el desarrollo normal del cacao, con funciones críticas en la floración, la fertilización y el crecimiento de los tejidos meristemáticos. Los análisis de suelos realizados en las

fincas de Tumaco revelaron niveles bajos de boro, una condición que puede tener repercusiones severas en la productividad y la calidad del grano. La deficiencia de boro en el cacao se manifiesta inicialmente mediante anormalidades reproductivas. Como describe López et al. (2021), se presenta una floración profusa en el tallo principal y en las ramas, acompañada, en ocasiones, por hinchamientos en los cojines florales. Desde lo microscópico, la viabilidad del polen disminuye y el crecimiento de los tubos polínicos se ve afectado, lo que reduce la fecundación efectiva y la formación de semillas. Como consecuencia directa, los frutos que logran desarrollarse exhiben deformaciones y puntos necróticos, hecho que disminuye tanto su calidad comercial como su valor productivo.

Desde un enfoque fisiológico, la deficiencia de boro impacta de manera preferencial en los puntos de crecimiento activo. Según Mejía (2000), los síntomas más notorios se presentan en los tejidos jóvenes, como brotes nuevos y hojas en formación, mientras que los tejidos maduros pueden aparentar normalidad, lo cual dificulta la detección temprana de la carencia en observaciones superficiales.

El boro también participa en procesos fundamentales como la síntesis de paredes celulares, el transporte de azúcares y la regulación hormonal, por lo que su deficiencia limita la reproducción, el crecimiento vegetativo y la resistencia estructural de las plantas. En sistemas tradicionales como los de Tumaco, donde no se realizan aplicaciones sistemáticas de micronutrientes, la corrección de la deficiencia de boro constituye un componente crítico para mejorar la producción de cacao y asegurar su sostenibilidad a largo plazo.

La deficiencia severa de boro (B) en sistemas de producción de cacao genera alteraciones estructurales que comprometen seriamente la integridad de las plantas. Uno de los síntomas más distintivos, según Inpofos (1997), es la aparición de quebraduras en los tallos y ramas jóvenes, acompañadas de exudaciones en los tejidos afectados. Esa manifestación refleja daños de orden celular en los meristemas, resultado de la interrupción en la síntesis de paredes celulares y en la movilidad de carbohidratos.



Para corregir la deficiencia de boro y prevenir esos daños estructurales se recomienda ajustar el pH del suelo hasta valores cercanos a 6.5 mediante encalado, lo que mejora la disponibilidad de boro y reduce la fijación de ese micronutriente en formas insolubles. Además, el incremento controlado de calcio (Ca) y potasio (K) en el suelo favorece la estabilidad iónica y contribuye al balance general de nutrientes esenciales.

Sin embargo, en Tumaco persiste un desconocimiento generalizado entre los productores acerca de la importancia fisiológica del boro en el cultivo de cacao. Ese micronutriente es fundamental no solo para el crecimiento y elongación celular, sino también para procesos reproductivos críticos como la polinización y la formación de frutos (Alarcón, 2002). Su deficiencia afecta la estructura vegetal y limita directamente el éxito reproductivo y la productividad de las plantaciones.

Esa situación permite plantear alternativas sostenibles de manejo, como la reincorporación de abonos orgánicos bien descompuestos y la aplicación de biofertilizantes enriquecidos con boro, los cuales pueden mejorar progresivamente la disponibilidad de ese micronutriente en el suelo y, así, restaura la salud y el potencial productivo de los sistemas cacaoteros.

Implementar es de tipo de estrategias adaptadas permitirá corregir las deficiencias existentes y promover la resiliencia de los sistemas de cacao frente a las limitaciones edáficas crónicas que afectan la región de Tumaco.

4.8.6 Calcio (Ca)

Los análisis de suelos realizados en las fincas de Tumaco evidenciaron contenidos altos de calcio (Ca), particularmente en predios localizados en zonas de vega o planicie. Esa condición, aunque podría parecer favorable en un contexto edáfico general, plantea problemas agronómicos importantes al combinarse con la alta humedad del suelo y la ausencia de drenajes adecuados. La saturación hídrica promueve oxidaciones edáficas y altera la dinámica de absorción de nutrientes, que afectan de manera indirecta la fisiología del cacao.

Según Larrea (2018), excesivos contenidos de calcio en los tejidos foliares pueden provocar trastornos metabólicos, al generar desbalances nutricionales con otros elementos esenciales como potasio (K), boro (B) y magnesio (Mg). Para un óptimo funcionamiento fisiológico de la planta, debe existir un equilibrio armónico entre esos cationes, ya que su antagonismo iónico puede limitar la disponibilidad y absorción mutua.

Por otro lado, aunque en el presente caso predomina el exceso de calcio, es importante reconocer que la deficiencia de calcio también representa una amenaza en otros contextos productivos. Según Inpofos (1997) y Ocampo (2020), los síntomas de deficiencia de calcio se manifiestan inicialmente en hojas jóvenes, en las que aparecen parches necróticos que inician como manchas blancas cerca de los márgenes. En condiciones severas se presenta caída prematura de hojas, necrosis apical, muerte de brotes y disminución del crecimiento radicular.

En síntesis, aunque los niveles elevados de calcio en los suelos de Tumaco no reflejan una carencia inmediata de ese nutriente, sí evidencian la necesidad de un manejo integral del suelo, que incluya la mejora de drenajes internos y un seguimiento del balance iónico para prevenir desórdenes fisiológicos. Una fertilización balanceada, ajustada a análisis de suelos periódicos, será crucial para optimizar la disponibilidad relativa de nutrientes y potenciar la productividad y sostenibilidad de los sistemas tradicionales de cacao en la región.

El calcio (Ca) constituye uno de los nutrientes estructurales más importantes para el cultivo de cacao, al jugar un papel determinante en la integridad de los tejidos celulares, el desarrollo vegetativo y la fructificación. Según Seipasa (2020), el calcio no actúa de manera aislada, sino que se complementa funcionalmente con el boro (B), formando un eje crítico para el fortalecimiento de paredes celulares, la elongación de brotes y la fecundación efectiva de flores.

El calcio, al ser parte integral de las laminillas medias de las paredes celulares, confiere resistencia mecánica a los tejidos, mejora la cohesión



celular y optimiza los procesos de transporte de nutrientes dentro de la planta. Su presencia en concentraciones adecuadas asegura el crecimiento estructural sano, favorece el desarrollo radicular profundo y aumenta la tolerancia de las plantas frente a condiciones extremas como estrés hídrico o salino.

Ante las deficiencias o desbalances, detectados en los sistemas tradicionales de cacao en Tumaco, existen alternativas sostenibles de manejo que permiten mantener y mejorar los niveles nutricionales de calcio en el suelo y en los tejidos vegetales. Entre esas estrategias destacan:

- La elaboración y aplicación de biofertilizantes a base de sulfatos de calcio, que contribuyen a remineralizar el suelo y mejorar su estructura física,
- La fertilización foliar con formulaciones diseñadas para tener modos de acción sinérgicos, que permiten una absorción rápida y eficiente de calcio, complementando la nutrición edáfica y reduciendo bloqueos enzimáticos y fisiológicos que ocurren bajo condiciones extremas (Seipasa, 2020).

Estas prácticas, implementadas de manera técnica y adaptada a las condiciones edáficas locales, representan una vía prometedora para mejorar la nutrición del cacao en Tumaco, al restaurar la vitalidad de las plantas, optimizar el crecimiento radicular y fortalecer la resistencia estructural de los sistemas productivos.

4.8.7 Magnesio (Mg)

Los análisis de suelos realizados en las fincas cacaoteras de Tumaco muestran que el contenido de magnesio (Mg) es medio, condición que, si bien no representa una deficiencia crítica inmediata, requiere ser monitoreada y complementada mediante programas de fertilización adaptados, para garantizar el suministro adecuado de este nutriente esencial a lo largo del ciclo del cultivo.

El magnesio cumple funciones clave en el metabolismo vegetal, al actuar como el átomo central de la molécula de clorofila, y participar en procesos bioquímicos fundamentales como la fotosíntesis, la transferencia de energía (ATP) y la activación enzimática. Su importancia en el cacao es particularmente crítica en fases de crecimiento activo, floración y llenado de frutos, en las cuales las demandas metabólicas son elevadas.

De acuerdo con Mejía (2000), el perfil de absorción de nutrientes en cacao ubica al potasio (K) como el nutriente más requerido, seguido de nitrógeno (N), calcio (Ca) y, en cuarto lugar, el magnesio (Mg). La cantidad de cada nutriente extraído por el cultivo varía considerablemente en función del estado fenológico del árbol, por cuanto refleja la dinámica fisiológica cambiante entre etapas de crecimiento vegetativo, desarrollo floral y producción de mazorcas.

En este contexto, la presencia media de magnesio en los suelos de Tumaco sugiere que, para mantener la productividad y la salud de las plantaciones, es recomendable implementar fórmulas de fertilización que incluyan fuentes de magnesio. De no hacerlo se corre el riesgo de que, en etapas de alta demanda (floración y fructificación), la planta enfrente limitaciones nutricionales que comprometan su desempeño productivo y su resiliencia a factores de estrés ambiental.

En síntesis, el manejo nutricional del magnesio debe ser proactivo y estratégico, adaptativo al ritmo de desarrollo del cultivo; igual, se debe garantizar la disponibilidad de ese nutriente en los momentos críticos del ciclo productivo, para así fortalecer la sostenibilidad de los sistemas de cacao en Tumaco.

La deficiencia de magnesio (Mg) en plantas de cacao se expresa, ante todo, en alteraciones del color foliar, siguiendo un patrón característico que permite su diagnóstico visual en campo. Según Barriga et al. (2006), uno de los primeros signos de deficiencia se observa en las hojas viejas, donde el área cercana al nervio central pierde su color verde intenso, y adopta un tono verde pálido o amarillo pálido.



Este amarillamiento progresivo no ocurre de manera uniforme: inicia en la zona intermedia de la hoja y se expande hacia los bordes, afectando de forma paulatina toda la periferia foliar. A medida que la deficiencia se agrava, las orillas de las hojas muestran decoloración marcada; al final se presenta necrosis marginal, que conduce a la muerte parcial del tejido foliar.

Desde una perspectiva fisiológica, esta sintomatología refleja el papel crítico del magnesio en la síntesis de clorofila y en el metabolismo energético de la planta. La tendencia a que los síntomas aparezcan primero en hojas viejas responde a la movilidad moderada del magnesio dentro de la planta, ya que el cultivo tiende a movilizar ese nutriente hacia tejidos jóvenes en formación y, así, deja desprovistas de magnesio a las hojas más maduras.

La identificación temprana de esos signos visuales resulta crucial para implementar estrategias correctivas oportunas, como la aplicación dirigida de fertilizantes magnésicos, antes de que la deficiencia impacte negativamente el crecimiento, la floración o la productividad del cacao.

En los sistemas tradicionales de producción de cacao en Tumaco, los excesivos contenidos foliares de calcio (Ca) pueden desencadenar diversos trastornos metabólicos que afectan de manera crítica la fisiología y productividad del cultivo. Según Laínez (1979), el desequilibrio entre las concentraciones de calcio, potasio (K), boro (B) y magnesio (Mg) compromete múltiples procesos celulares, que afectan la absorción, translocación y utilización eficiente de esos nutrientes esenciales.

En condiciones de exceso de calcio se produce antagonismo nutricional, dado que el calcio inhibe la disponibilidad o absorción de potasio, boro y magnesio, nutrientes vitales para el mantenimiento del balance osmótico, el desarrollo floral, la síntesis de clorofila y la producción de energía. La no corrección de dicho desbalance genera reducciones significativas en el crecimiento vegetativo, la floración efectiva y la formación de frutos, lo cual limita la productividad sostenible de las fincas.

Una limitante adicional crítica es el desconocimiento técnico generalizado entre los productores acerca de los procesos fisiológicos fundamentales,

como la fotosíntesis y el rol esencial de los nutrientes en el desarrollo ideal del cultivo. Como señala Graetz (2020), la falta de comprensión sobre cómo interactúan los elementos minerales dentro de la planta obstaculiza la adopción de prácticas agronómicas adecuadas, perpetuando sistemas productivos de baja eficiencia y elevada vulnerabilidad.

Ante este escenario, es imperativo implementar programas de capacitación agroecológica y nutricional adaptados a las realidades locales, que permitan a los agricultores identificar los síntomas de desbalances nutricionales, pero también comprender cómo optimizar el estado fisiológico de sus cultivos para alcanzar mayores niveles de productividad, resiliencia y sostenibilidad.

4.8.8 Potasio (K) en Sistemas Tradicionales de Producción de Cacao

Los análisis de suelo realizados en las fincas de cacao en Tumaco evidencian que los niveles de potasio (K) son medios, una condición que resulta crítica dada la alta demanda de ese nutriente por parte del cultivo. Según Mejía (2000), el potasio es el nutriente más absorbido por el cacao, seguido en importancia por el nitrógeno (N), calcio (Ca) y magnesio (Mg).

La cantidad exacta de nutrientes removidos depende no solo de la composición edáfica inicial, sino también del estado de nutrición de la planta y del nivel productivo alcanzado (Omotoso, 1975; Fassbender et al., 1988; Uribe et al., 2000; Sánchez et al., 2005; Enríquez, 2005).

La deficiencia de potasio en cacao se manifiesta inicialmente mediante el amarillamiento de los bordes de las hojas, que progresa hacia el interior de los limbos (Mejía et al., 2000). Ese síntoma visual es indicativo de una alteración en el balance osmótico celular, que afecta procesos vitales como el transporte de agua y nutrientes, la síntesis de proteínas y la regulación estomática.

El potasio desempeña funciones esenciales en el metabolismo energético, la síntesis de carbohidratos, la translocación de azúcares, la activación



enzimática y la apertura y cierre estomático, procesos clave tanto durante la fase vegetativa (crecimiento) como en la fase reproductiva (floración y llenado de frutos) (López et al., 2015). Su deficiencia, además de impactar la arquitectura foliar, se traduce en frutos de bajo peso, relleno deficiente de semillas y, en consecuencia, en una merma significativa en el rendimiento y calidad del cacao.

Los hallazgos destacan la importancia de diseñar programas de fertilización específicos que garanticen el suministro adecuado de potasio en las fincas, en particular, en sistemas tradicionales donde la extracción progresiva de nutrientes no siempre es compensada por prácticas de reposición mineral.

En el cultivo de cacao, el potasio (K) es el nutriente de mayor requerimiento a lo largo de todas las fases de desarrollo: crecimiento vegetativo, formación floral y producción de frutos (Rafael, 2012). Su demanda constante obedece a su rol fundamental en la regulación osmótica, el transporte de fotoasimilados, la síntesis de proteínas y la activación enzimática, procesos indispensables para el desempeño fisiológico óptimo del cultivo.

El potasio es esencial para formar frutos de buen peso y calidad, también mejora la tolerancia del cacao al estrés hídrico y fortalece las defensas naturales de la planta frente a patógenos. Según Montecino (2014), el potasio es el macronutriente más absorbido por el cacao, y su adecuada disponibilidad resulta crítica para alcanzar niveles de productividad superiores y garantizar la rentabilidad sostenida del sistema productivo. Las deficiencias de potasio detectadas en los sistemas tradicionales de Tumaco han posibilitado desarrollar alternativas sostenibles para su reposición, en favor de minimizar el uso de fertilizantes de síntesis química. Algunas de esas estrategias incluyen:

- La aplicación de abonos orgánicos elaborados mediante compostaje de residuos de cosecha (de cacao, musáceas y frutales asociados).

- La formulación de biofertilizantes enriquecidos con sulfatos y microorganismos eficientes, que mejoran la solubilidad y disponibilidad del potasio en el suelo (Fundación Suyusama, 2021).

Prácticas como estas contribuyen a equilibrar el estado nutricional del sistema y a favorecer la estructura del suelo, incrementar su actividad biológica y reducir los costos de producción, al promover la sostenibilidad agroecológica del cacao en la región.

4.8.9 Hierro (Fe) en Suelos Cacaoteros: Toxicidad Potencial y Efectos Fisiológicos

Los análisis de suelos realizados en las fincas cacaoteras de Tumaco revelan altas concentraciones de hierro (Fe), situación que sugiere la posibilidad de toxicidad edáfica. Ese fenómeno se asocia frecuentemente con condiciones de mal drenaje superficial y elevada humedad del suelo, factores que favorecen la solubilización excesiva de hierro en formas fitotóxicas (Agrosavia, 2021).

Aunque el hierro es un micronutriente esencial para procesos críticos como la síntesis de clorofila y la respiración celular, su exceso desencadena efectos perjudiciales en el metabolismo vegetal. Como advierte Alvim (1961), la sobrecarga de hierro incrementa la formación de radicales libres de oxígeno, especies reactivas que provocan degradación de proteínas, peroxidación de lípidos de membranas celulares y disfunción fisiológica generalizada.

Los síntomas característicos de la toxicidad por hierro incluyen la aparición de pequeñas manchas de color pardo en las puntas de las hojas viejas, que progresan hacia un blanqueamiento generalizado del tejido foliar en casos severos. Además, se observan tallos cortos y delgados, resultado de la inhibición del crecimiento celular (Marrocos et al., 2010). Manifestaciones como estas son típicas de suelos mal drenados, pobres en materia orgánica y, en algunos casos, de suelos alcalinos, aunque en Tumaco predominan suelos ácidos con problemas de saturación hídrica.



Dada esa condición, no se recomienda la aplicación adicional de fuentes de hierro en la región. Más bien, las estrategias de manejo deben enfocarse en mejorar el drenaje interno de las fincas, incrementar el contenido de materia orgánica y adoptar prácticas de conservación de suelos que minimicen el riesgo de toxicidad edáfica y protejan el equilibrio fisiológico del cacao.

Los análisis de suelos realizados en las fincas cacaoteras de Tumaco revelan altos niveles de hierro (Fe), situación que plantea una potencial toxicidad edáfica. Esta condición se asocia principalmente a problemas de mal drenaje superficial, frecuente en suelos con deficiencias estructurales y en regiones de alta pluviosidad. Según Agrosavia (2021), en estos casos no se recomienda la aplicación adicional de micronutrientes como hierro o manganeso, ya que su acumulación podría agravar los riesgos de toxicidad.

Aunque el hierro cumple funciones esenciales para el desarrollo vegetal, como la formación de clorofila y la facilitación de procesos redox en las plantas, su exceso resulta altamente perjudicial. Como lo señala Alvim (1961), el hierro en concentraciones elevadas incrementa la formación de radicales de oxígeno, moléculas reactivas que causan daño celular severo a través de la degradación de proteínas y la peroxidación de lípidos en las membranas celulares.

Desde el punto de vista sintomático, la toxicidad por hierro se manifiesta inicialmente con pequeñas manchas de color pardo en las puntas de las hojas más viejas. Conforme la condición se agrava, el blanqueamiento progresivo del follaje, así como el desarrollo de tallos cortos y delgados, se hacen evidentes (Marrocos et al., 2010). Ese cuadro es característico de suelos alcalinos, mal drenados y pobres en materia orgánica, aunque en Tumaco predominan suelos ácidos, donde el encharcamiento prolongado promueve fenómenos similares de solubilización excesiva de Fe.

Esos hallazgos resaltan la necesidad de implementar estrategias de manejo integral del suelo enfocadas en mejorar el drenaje interno, incrementar el contenido de materia orgánica y fortalecer la estructura del suelo, con

el fin de mitigar los riesgos de toxicidad y preservar la fisiología saludable del cultivo de cacao.

A pesar de los avances recientes en la obtención de genotipos de cacao tolerantes a la acidez, el método más eficaz desde el punto de vista técnico y económico para corregir ese problema sigue siendo la aplicación de materiales básicos, conocidos como enmiendas calcáreas. La práctica, denominada encalado, consiste en neutralizar el exceso de acidez del suelo, para así mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales y optimizar el ambiente radicular para el desarrollo de los cultivos.

Según Castellano (2014), los materiales más utilizados para el encalado incluyen carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y/o magnesio. Cada uno de esos compuestos actúa aumentando el pH del suelo, desplazando los iones de hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{3+}) tóxicos de los sitios de intercambio catiónico, de manera que permita un ambiente edáfico más favorable para la absorción de nutrientes como fósforo, potasio, calcio y magnesio.

El encalado, además de corregir la acidez, tiene efectos positivos indirectos sobre la estructura del suelo, la actividad microbiana y la eficiencia de uso de los fertilizantes aplicados. Su implementación resulta fundamental en regiones como Tumaco, donde los análisis de suelos evidencian problemas de acidez moderada a severa, que afectan en forma directa la productividad y sostenibilidad de los sistemas tradicionales de cacao.

La práctica de fertilización en sistemas tradicionales de cacao –en particular con fuentes nitrogenadas y fosfatadas– debe ser evaluada de manera integral y estratégica, con el objetivo de incrementar el rendimiento o mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Como advierten López et al. (2000), también resulta fundamental considerar el impacto potencial sobre la composición y el comportamiento de la biota edáfica, dado que una fertilización inadecuada puede inhibir procesos biológicos esenciales o incrementar la dependencia de insumos externos, que afectan la resiliencia ecológica del sistema.



En este contexto de fertilización sostenible, y considerando los resultados de suelos que indican altas concentraciones de hierro (Fe) en las fincas de Tumaco, se plantea la necesidad de adoptar medidas específicas para mitigar la toxicidad férrica y proteger la funcionalidad del sistema agroforestal. López (2021) recomienda las siguientes prácticas de manejo:

1. Aplicación complementaria de nutrientes: aumentar las dosis de potasio (K), fósforo (P) y magnesio (Mg), que ayudan a contrarrestar el efecto fitotóxico del hierro sobre las plantas.
2. Corrección de la acidez edáfica: realizar encalado en suelos ácidos para elevar el pH y reducir la solubilidad del hierro, minimizando su disponibilidad en formas fitotóxicas.
3. Control de inundaciones: eliminar el exceso de agua mediante la remoción rápida de encharcamientos, reduciendo así las condiciones anóxicas que favorecen la movilización tóxica del hierro.
4. Mejora de la oxigenación del suelo: implementar drenajes efectivos y mantener el suelo libre de agua superficial pero húmedo durante 7 a 10 días, facilitando un mejor suministro de oxígeno a la rizosfera.

Estas estrategias buscan mitigar la toxicidad específica del hierro y restaurar un ambiente edáfico saludable, esencial para la sostenibilidad agronómica, ecológica y económica de los sistemas de producción de cacao en la región.

4.8.10 Cobre (Cu): Rol Fisiológico, Diagnóstico y Estrategias de Manejo

Los análisis de suelos realizados en las fincas de cacao en Tumaco revelan contenidos medios de cobre (Cu), un micronutriente esencial para la funcionalidad fisiológica de las plantas. El cobre actúa como activador enzimático clave, que participa en la síntesis de lignina, un componente

estructural fundamental que confiere resistencia mecánica a los tejidos vegetales. Asimismo, el cobre es indispensable para el funcionamiento de varios sistemas enzimáticos implicados en procesos críticos como la fotosíntesis, la respiración celular y el metabolismo de carbohidratos y proteínas (López, 2021).

Desde el punto de vista de su dinámica en el suelo-vegetal, el cobre se clasifica como un elemento parcialmente móvil dentro de los tejidos vegetales, junto con hierro, zinc, manganeso y molibdeno (Sánchez et al., 2005). Esa movilidad parcial implica que las deficiencias de cobre se manifiestan preferentemente en órganos jóvenes, donde su demanda metabólica es más elevada.

En suelos de cacao con acidez moderada a severa, como los de Tumaco, el encalado hasta alcanzar un pH entre 6,5 y 7,0 constituye una práctica efectiva para mejorar la disponibilidad de cobre, a la vez que ayuda a mitigar la toxicidad de otros elementos como aluminio y hierro. Además, en condiciones donde se evidencia deficiencia moderada de Cu, el incremento del nitrógeno en combinación con suplementos específicos de cobre puede favorecer la recuperación del equilibrio nutricional y mejorar la resiliencia fisiológica del cultivo.

En suma, el manejo racional del cobre, considerando tanto su rol bioquímico como su disponibilidad edáfica, es esencial para optimizar la productividad y reforzar la salud fisiológica de los sistemas de producción de cacao en entornos tropicales complejos como Tumaco.

La evaluación de los niveles de nutrientes en el tejido foliar constituye una herramienta indispensable para monitorear el efecto real de las aplicaciones de fertilizantes sobre el estado nutricional de las plantas y su impacto en la productividad (Bukovac et al., 1957). El análisis foliar permite detectar de manera temprana desequilibrios nutricionales que no siempre se evidencian de forma inmediata en síntomas visibles o en el análisis de suelos.



Sin embargo, un aspecto crítico que emerge en la nutrición del cacao es la posibilidad de interacciones negativas entre nutrientes. Según Infocafés (2002), el exceso de potasio (K), fósforo (P) u otros micronutrientes puede inducir deficiencias secundarias de cobre (Cu), al alterar la absorción o disponibilidad relativa de ese elemento esencial. Asimismo, pH elevados en el suelo o sustrato disminuyen la disponibilidad de cobre para la planta, al exacerbar el riesgo de deficiencia a pesar de concentraciones que se suponen adecuadas en el suelo.

Es recomendable la aplicación puntual de sulfato de cobre o productos equivalentes para corregir deficiencias de cobre. No obstante, como advierte López (2021), esta práctica debe ejecutarse con suma precaución, ya que la línea entre la corrección nutricional y la fitotoxicidad es extremadamente delgada. Dosis inadecuadas pueden derivar en acumulaciones tóxicas, ya que afectan negativamente procesos fisiológicos claves como la fotosíntesis, la respiración celular y la formación estructural de tejidos.

En este sentido, el enfoque más seguro y sostenible es realizar aplicaciones basadas en diagnósticos foliares periódicos, combinados con prácticas agronómicas que mantengan el equilibrio nutricional integral del sistema, por cuanto aseguran que la solución no genere nuevos problemas de toxicidad o desbalance edáfico.

4.8.11 Manganeso (Mn): Presencia Elevada y Manifestaciones Fisiológicas en Cacao

Los análisis de suelos realizados en las fincas de cacao en Tumaco indican contenidos elevados de manganeso (Mn), un micronutriente esencial, pero que en concentraciones excesivas puede generar alteraciones fisiológicas importantes. Uno de los síntomas más característicos de su toxicidad es la aparición de clorosis intervenal en hojas jóvenes, donde las nervaduras principales permanecen verdes mientras los espacios entre ellas se tornan amarillentos, fenómeno común en suelos alcalinos o mal drenados (Vivar, 2013).

Incluso, García (1998) y Marschner (2003) describen que el exceso de manganeso puede inducir necrosis marginal inicialmente en las hojas más viejas, manifestándose como manchas intervenales pardas o cafés rodeadas por zonas cloróticas. Ese desequilibrio también puede desencadenar pérdida de dominancia apical y la proliferación de chupones axilares, al afectar el patrón de crecimiento normal del cacao y comprometer la producción.

Otro aspecto crítico es que la toxicidad por manganeso no actúa de manera aislada: puede interferir con la absorción y utilización de otros nutrientes esenciales como calcio (Ca), hierro (Fe) y magnesio (Mg), debido a que exacerba los problemas nutricionales y fisiológicos en las plantas.

Con base en este contexto, es fundamental monitorear regularmente el estado nutricional mediante análisis foliares y edáficos, además de optimizar el drenaje del suelo y ajustar el pH a niveles ligeramente ácidos para minimizar la solubilidad excesiva del manganeso; prácticas contribuyen a mantener el balance nutricional adecuado, y protegen la salud fisiológica de las plantaciones de cacao en condiciones edáficas vulnerables como las de Tumaco.

De acuerdo con López (2018), los micronutrientes o elementos menores son esenciales en pequeñas cantidades, pero cumplen funciones críticas en el metabolismo vegetal. Entre ellos se destacan el boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), níquel (Ni), molibdeno (Mo) y cloro (Cl). Cada uno de esos nutrientes participa activamente en procesos fundamentales como la fotosíntesis, la respiración celular, la síntesis de proteínas y la formación estructural de tejidos.

Del mismo modo, se reconoce la existencia de elementos cuya esencialidad estricta aún no ha sido comprobada en su totalidad, pero cuya presencia en ciertos contextos agrícolas y fisiológicos produce efectos benéficos. Tal es el caso del silicio (Si), el yodo (I) y el sodio (Na), elementos que, si bien no siempre son indispensables para todos los cultivos, pueden mejorar la resistencia al estrés abiótico, la eficiencia fotosintética o la homeostasis osmótica. De la misma forma, el cobalto (Co) desempeña un



papel indispensable en procesos específicos como la fijación simbiótica del nitrógeno, esencial para el metabolismo de leguminosas y otras especies asociadas en sistemas agroforestales.

Comprender la función específica y diferenciada de cada nutriente esencial, así como de los elementos benéficos, resulta fundamental para el diseño de estrategias de fertilización más integrales y adaptativas. Estas estrategias deben corregir deficiencias inmediatas y anticipar tensores edafoclimáticos que afecten la productividad a largo plazo. En regiones de alta complejidad ambiental como Tumaco, donde los sistemas tradicionales de cacao enfrentan desafíos múltiples desde suelos empobrecidos hasta limitaciones de acceso tecnológico, este enfoque nutricional integral se convierte en una herramienta estratégica para promover la sostenibilidad, potenciar la resiliencia agroecológica y asegurar la continuidad productiva y cultural de la cacaocultura local.

El efecto característico de la fitotoxicidad por manganeso (Mn) en sistemas de producción de cacao es una reducción progresiva del crecimiento vegetal a medida que la concentración de Mn supera los niveles críticos de tolerancia fisiológica. El desequilibrio nutricional compromete procesos fundamentales como la división celular, la síntesis de clorofila y el transporte de electrones en la fotosíntesis, afectando directamente la productividad del cultivo (Silva, 2007).

Para contrarrestar esa situación, existen diversas estrategias agronómicas complementarias. Una de las principales prácticas recomendadas es el encalamiento del suelo para elevar el pH a niveles entre 6.0 y 6.5, lo cual disminuye la solubilidad y, por tanto, la disponibilidad tóxica del manganeso. Por lo expuesto, se sugiere la aplicación de magnesio (Mg) en dosis elevadas, dado que este elemento compite con el manganeso en los sitios de absorción radicular, al reducir su toxicidad relativa. De forma simultánea, el aumento de la disponibilidad de fósforo (P) mejora la estructura radicular y la resistencia al estrés por metales pesados.

Otra medida de largo plazo incluye el empleo de genotipos de cacao más tolerantes a suelos ácidos o con alto contenido de manganeso, una

estrategia de selección genética que puede incrementar la resiliencia productiva. Finalmente, la incorporación sistemática de materia orgánica al suelo mediante compostajes, biofertilizantes o abonos verdes mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, fomenta la complejación de metales y disminuye su toxicidad efectiva.

Cuando las citadas alternativas son implementadas de manera articulada mitigan los efectos de la fitotoxicidad por manganeso, y fortalecen la sostenibilidad y la productividad de los sistemas tradicionales de cacao en ambientes frágiles como los de Tumaco.

4.8.12 Zinc (Zn): Desafíos de Deficiencia y Toxicidad en Suelos Cacaoteros

El análisis de suelos realizado en las fincas de cacao de Tumaco evidenció bajos niveles de zinc (Zn), un micronutriente esencial para numerosos procesos metabólicos de la planta, incluido el crecimiento celular y la síntesis de proteínas. De acuerdo con Lora (1999), la deficiencia de zinc provoca distorsiones morfológicas en las hojas nuevas, que adoptan una forma falciforme (similar a una hoz), con una curvatura acentuada que limita la expansión foliar normal.

Del mismo modo, reportaron que la deficiencia inducida de hierro –manifestada como clorosis en hojas jóvenes– puede ser también un síntoma típico de toxicidad por zinc (García, 1998; Marschner, 2003). En suelos ácidos o ligeramente ácidos, comunes en Tumaco, la toxicidad por zinc puede ser exacerbada por la aplicación continua y excesiva de fertilizantes enriquecidos con ese microelemento o de plaguicidas que contienen Zn en su formulación.

Las evidencias destacan la necesidad de esmerarse en gestionar la fertilización con zinc, de forma que se equilibre su aporte con el fin de evitar deficiencias y toxicidades. Una estrategia sostenible incluye monitoreo regular de suelos y tejidos foliares, aplicaciones controladas de fuentes de Zn, y el fomento de la materia orgánica para mejorar la retención y libe-



ración gradual de micronutrientes, para que se adapte a las condiciones dinámicas de los sistemas tradicionales de cacao en Tumaco.

Estudios de Casierra y Poveda (2005) y Muchaweti et al. (2006) demostraron que la contaminación de las aguas costeras con zinc (Zn) y otros metales pesados incrementa su concentración en los suelos agrícolas hasta alcanzar niveles tóxicos, lo que afecta la sanidad y productividad de diversos cultivos. En regiones tropicales y costeras como Tumaco, donde la influencia marina es considerable y las prácticas de manejo de suelos son limitadas, este riesgo cobra especial relevancia.

A pesar de la importancia crítica de ese micronutriente, las deficiencias nutricionales de zinc pasan frecuentemente desapercibidas por los productores locales, debido a la escasa formación técnica en diagnóstico foliar y edáfico (López, 2021). La falta de conocimiento especializado impide la implementación de planes de manejo nutricional adaptados a las necesidades del cultivo de cacao, y ello perpetúa las condiciones de baja fertilidad química y limita el potencial productivo de las fincas.

La combinación de factores externos (como la contaminación ambiental) y endógenos (como la carencia de planes de fertilización adecuados) evidencia la urgente necesidad de fortalecer los programas de capacitación técnica, promover la monitorización periódica de suelos y fomentar estrategias de nutrición equilibrada en los sistemas tradicionales de cacao. Solo así será posible romper el círculo vicioso de degradación productiva y avanzar hacia modelos agrícolas más sostenibles y resilientes en Tumaco.

El zinc (Zn) es uno de los micronutrientes esenciales para el crecimiento y la reproducción normales de las plantas, debido a que participa de manera activa en procesos metabólicos como la síntesis de proteínas, la regulación hormonal y la formación de estructuras celulares. Aun así, a pesar de sus requerimientos relativamente bajos en comparación con los macronutrientes, el Zn es considerado hoy el micronutriente más deficiente en los sistemas agrícolas a nivel mundial (Intagri, 2008).

Se estima que alrededor del 40 % al 50 % de los suelos cultivados del mundo presentan deficiencia crítica de zinc, hecho que afecta tanto la productividad de los cultivos como la calidad nutricional de los alimentos derivados. Esa alarmante cifra genera un desafío silencioso, pero de gran magnitud para la agricultura sostenible y la seguridad alimentaria global.

En regiones tropicales marginales como Tumaco, donde las condiciones edafoclimáticas y socioeconómicas limitan el acceso a tecnologías de manejo nutricional, el impacto de esa deficiencia se amplifica, porque perpetúa ciclos de baja productividad agrícola y vulnerabilidad social. Comprender esa dimensión global-local de la deficiencia de zinc es crucial para diseñar estrategias de manejo integral que fortalezcan la resiliencia de los sistemas tradicionales de cacao y promuevan la sostenibilidad agrícola en territorios periféricos.

Frente a la evidencia de deficiencia de zinc (Zn) en los suelos cacaoteros de Tumaco, una de las alternativas de corrección más viables a corto plazo es la fertilización edáfica dirigida. La suplementación de Zn mediante fertilizantes hidrosolubles permite corregir rápidamente la deficiencia en las plantas, incrementar la concentración de este micronutriente en los granos, y, como resultado, mejorar los rendimientos productivos y las utilidades de los agricultores (Intagri, 2008).

Para optimizar la efectividad de la fertilización, es crucial emplear fuentes de zinc de alta solubilidad, como el sulfato de zinc monohidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) o soluciones quelatadas, las cuales son eficaces tanto en suelos ácidos como en suelos alcalinos. La aplicación adecuada de esos fertilizantes atiende las necesidades inmediatas de la planta y contribuye a restaurar de forma gradual el balance nutricional del suelo.

Este enfoque debe integrarse dentro de un plan de manejo sostenible del cultivo, que considere también el estado de la materia orgánica, el pH del suelo y la disponibilidad de otros micronutrientes esenciales, para garantizar así una mejor adaptación de las plantas, una mayor eficiencia en el uso de los insumos y una reducción de la vulnerabilidad productiva ante a las condiciones ambientales cambiantes.



5. ESTRATEGIAS DE MANEJO PARTICIPATIVO PARA CADA TIPOLOGÍA DE FINCA DE CACAO IDENTIFICADA

5.1 *Alternativas de Manejo*

Cumplida la identificación y caracterización de las tipologías de sistemas tradicionales de producción de cacao en Tumaco, se diseñó un proceso de construcción participativa de estrategias de manejo sostenible. Para ello, se organizaron talleres con los productores de cada tipología tendientes a fomentar la co-creación de soluciones a partir de la integración entre el conocimiento tradicional local, las experiencias de manejo cotidianas y los enfoques técnicos modernos.

La metodología participativa, respaldada ampliamente por la literatura científica como un pilar clave para la adopción efectiva de innovaciones agrícolas (Pretty et al., 2020), permitió construir alternativas de manejo adaptadas a las realidades y limitaciones específicas de cada grupo de productores. Las estrategias propuestas aspiran optimizar la productividad y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas productivos, sin descuidar los componentes ambientales, económicos y sociales que inciden en la competitividad y resiliencia del sector cacaotero en la región.

El proceso de diálogo, reflexión y concertación evidenció que las soluciones deben ser muy sensibles con el contexto: respetando la identidad cultural, reconociendo la diversidad ecológica y priorizando la apropiación local de los cambios propuestos. Así, el enfoque participativo constituye una herramienta técnica y un mecanismo estratégico para construir fincas más productivas, sostenibles y socialmente arraigadas en Tumaco.

5.1.1 *Estrategia de Manejo de las Fincas Tipo I*

Las fincas clasificadas como Tipo I, caracterizadas por rendimientos superiores a 1.000 kg/ha/año, representan modelos exitosos dentro del panorama cacaotero de Tumaco. La estrategia de manejo propuesta para este grupo busca consolidar y potenciar su desempeño, y asegurar la sostenibilidad productiva en el tiempo.

En primer lugar, se plantea mantener o incrementar la densidad de siembra actual, cercana a 1.000 árboles por hectárea, mediante el uso de materiales genéticos de alta calidad, tales como clones regionales adaptados (CCN 51, ICS 95 y otros materiales seleccionados); paso clave para sostener altos niveles de productividad sin comprometer la sanidad del cultivo ni la resiliencia del sistema.

Otro importante complemento es la implementación sistemática de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), incluyendo la poda regular tanto de los caocales como de las especies de sombrío, el control fitosanitario preventivo y la promoción de la polinización asistida para optimizar el cuajado de frutos. De manera prioritaria, se recomienda optimizar los sistemas de drenaje interno, dado que los análisis de suelo revelan altos niveles de hierro (Fe), asociados a deficiencias de drenaje, que podría desfavorecer el vigor radicular y la productividad a largo plazo.

Otro factor que se identificó en los suelos de estas fincas fue la presencia de bajos niveles de fósforo (P), azufre (S) y boro (B). Por tanto, se sugiere diseñar y aplicar un plan de fertilización edáfica balanceada, incorporando NPK y micronutrientes esenciales, con dosis ajustadas a las necesidades fenológicas del cultivo (Fedecacao, 2023). Esa nutrición de precisión fortalecerá el metabolismo de las plantas, mejorará su resistencia a enfermedades y permitirá sostener los altos niveles de producción alcanzados. Consolidar este tipo de sistemas exitosos es fundamental para reforzar la competitividad regional del cacao de Tumaco y para convertirlos en referentes de innovación agronómica capaces de inspirar y guiar la transformación de otros sistemas de producción tradicionales.

Este contexto se explica por el alto contenido de hierro presente en los suelos de Tumaco, un fenómeno frecuente en suelos encharcados, que incrementa la acidez y limita la absorción eficiente de nutrientes esenciales para el desarrollo del cultivo (Mahender et al., 2019). A su vez, el encharcamiento prolongado afecta negativamente la morfología radicular y reduce la supervivencia de las plantas, impactando de manera significativa los rendimientos productivos (Onyango et al., 2020).



Hidalgo et al. (2014) confirman que bajo condiciones de manejo técnico adecuado, las fincas de cacao pueden alcanzar o superar los 1.000 kg/ha/año, consolidándose como unidades productivas rentables. De manera complementaria, Suárez (2018) reporta que el acompañamiento técnico sistemático en regiones como Santander ha permitido a los productores lograr incrementos sostenidos en la productividad. A su vez, Fedecacao (2018) enfatiza que mediante la adopción de tecnologías, como la polinización asistida, la fertilización optimizada y un manejo agronómico intensivo, los cultivos tecnificados pueden alcanzar rendimientos de hasta 3.000 kg/ha/año, un objetivo ambicioso pero alcanzable para las fincas Tipo I de Tumaco, siempre y cuando se mantenga un esquema continuo de capacitación, asistencia técnica y monitoreo de indicadores productivos.

5.1.2 Estrategia de Manejo de las Fincas Tipo II

Las fincas agrupadas en el Tipo II, con rendimientos de entre 600 y 1.000 kg/ha/año, representan unidades productivas con un potencial significativo de mejora. La estrategia diseñada para este grupo prioriza el fortalecimiento de su estructura productiva mediante acciones integrales que permitan transitar de sistemas semi-intensivos a sistemas tecnificados sostenibles.

En primer lugar, se plantea incrementar la densidad de siembra mediante la introducción controlada de variedades de alta productividad y calidad, como CCN-51, clones regionales adaptados e híbridos de alta resiliencia. Esta renovación debe realizarse de manera gradual para evitar impactos bruscos sobre el ecosistema del sistema agroforestal, conservando la diversidad estructural de especies de sombrero –principalmente musáceas, frutales y algunos maderables–, pero promoviendo un manejo regulado de la cobertura para optimizar la disponibilidad de luz (López, 2021).

Después, se propone intensificar la implementación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), incluyendo la poda sistemática del cacao y del sombrero, el control de malezas con frecuencias adecuadas, y un control fitosanitario más regular, especialmente dirigido a plagas y enfermedades endémicas. La estrategia técnica debe ser complementada con la instalación

o adecuación de sistemas de drenaje internos, dada la evidencia de altos contenidos de hierro (Fe) en los suelos, lo que podría comprometer la absorción de nutrientes y la salud radicular.

Respecto al estado nutricional, los análisis de suelo revelan deficiencias marcadas en fósforo (P), azufre (S), potasio (K) y zinc (Zn). Por ello, se recomienda diseñar e implementar un plan de fertilización integral, ajustado a la fenología del cultivo y a las condiciones específicas de cada finca, combinando aplicaciones de fertilizantes químicos balanceados con estrategias de enmiendas orgánicas que mejoren la estructura y vida microbiana del suelo. Esa combinación contribuirá a restaurar el equilibrio nutricional, mejorar la eficiencia fisiológica del cultivo y aumentar su resiliencia frente a condiciones adversas.

En síntesis, la estrategia de manejo propuesta para las fincas Tipo II integra acciones agronómicas, nutricionales y de infraestructura que, articuladas bajo un programa de asistencia técnica continua y participativa, permitirá elevar los rendimientos hacia niveles superiores, consolidar la sostenibilidad productiva y la rentabilidad de esas unidades agrícolas en el mediano plazo.

Ferro y Meneses (1996) argumentan que la implementación sistemática de asistencia técnica y la adopción de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) potencian de manera significativa la sostenibilidad económica y transforman gradualmente las fincas en sistemas de producción integral y rentable. El enfoque encuentra respaldo en los hallazgos de Cordeagropaz (2015), quien evidencia que la ejecución oportuna de labores técnicas permite elevar los rendimientos de cacao por encima de los promedios nacional (550 kg/ha/año) y regional (480 kg/ha/año), lo que representa un avance estratégico hacia sistemas de mayor competitividad.

Al mismo tiempo, se plantea como prioritario fortalecer las capacidades de los productores mediante programas de capacitación continua, enfocados en el manejo agronómico eficiente, la gestión integrada de cultivos y el registro sistemático de costos de producción. Estas competencias son fundamentales para la toma de decisiones empresariales basadas en



indicadores técnicos y económicos. De igual forma, se destaca la importancia crítica de mejorar las infraestructuras viales de acceso a las fincas, aspecto señalado por la FAO (2023) como un limitante estructural que incide en forma directa en la frecuencia de atención al cultivo y en los costos de comercialización.

La integración de esas acciones no solo facilitaría la modernización progresiva de los sistemas productivos, sino que también permitiría que estas fincas evolucionen hacia estándares de tecnología media, con potencial de alcanzar rendimientos superiores a 1.000 kg/ha/año, conforme con las proyecciones de Fedecacao (2018). En tal sentido, se consolida un modelo de intervención orientado a la sostenibilidad económica, la resiliencia productiva y la dignificación del trabajo rural en el municipio de Tumaco.

5.1.3 Estrategia de Manejo de las Fincas Tipo III

La estrategia propuesta para las fincas Tipo III, caracterizadas por rendimientos inferiores a 600 kg/ha/año, se centra en la rehabilitación progresiva y la renovación estructural de los sistemas productivos. Como acción prioritaria, se plantea la resiembra de cacao utilizando materiales genéticos de alta productividad y tolerancia a enfermedades, como clones adaptados a condiciones de alta humedad y resistentes a moniliasis (*Moniliophthora roreri*). El objetivo es aumentar la densidad de siembra actual, que oscila entre 200-400 árboles/ha, hasta alcanzar un rango de 800-1.000 árboles/ha, optimizando así el uso del espacio y la eficiencia productiva.

De manera simultánea se promueve la implementación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), en particular, prácticas de poda sanitaria, manejo racional del sombrero y control fitosanitario integrado, acompañadas de un programa de adecuación de suelos que incluye la construcción de drenajes superficiales e internos para mitigar el encharcamiento crónico que afecta el desarrollo radicular. Dicha acción es crítica, dado que la escorrentía en terrenos de ladera exacerba la lixiviación de nutrientes esenciales y contribuye a la toxicidad por hierro (Fe), fenómeno ampliamente documentado en estudios regionales (Mantilla, 2002; López, 2021).

Los análisis de suelo realizados permiten diseñar un plan de fertilización ajustado a las necesidades específicas de esos sistemas degradados, y priorizan la corrección de deficiencias en fósforo (P), azufre (S), boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn). También se recomienda la incorporación de cal agrícola como estrategia correctiva para neutralizar la acidez del suelo y disminuir la biodisponibilidad de hierro tóxico, para así mejorar las condiciones edáficas en el desarrollo del cacao.

Por último, la sostenibilidad de esa estrategia dependerá de la articulación con programas de acceso a financiamiento rural, capacitación técnica continua y fortalecimiento organizativo. Solo a través de la combinación de intervención agronómica, social y económica será posible transformar esas fincas en unidades productivas más resilientes, rentables y sostenibles en el tiempo y, con ello, contribuir a revitalizar la cacaocultura tradicional en Tumaco.

La Fundación Suyusama (2021) plantea que la incorporación de biopreparados y abonos orgánicos constituye una alternativa al costo de los insumos químicos convencionales, porque favorece la nutrición integral del suelo y disminuye los costos de producción. En ese mismo sentido, Hidalgo et al. (2014) subrayan que la reinversión en prácticas de poda y rehabilitación del cacaotal puede traducirse en aumentos significativos de la productividad, mientras tanto, para Fedecacao (2018) es posible alcanzar rendimientos cercanos a 1.000 kg/ha/año en sistemas tradicionales con la adopción de tecnologías de manejo de mediana intensidad; para materializar ese potencial, resulta esencial la capacitación continua en técnicas de manejo agronómico y el registro sistemático de costos, dado que permite a los productores visualizar la rentabilidad real de sus explotaciones y facilita el acceso a líneas de crédito productivo (Suárez, 2018). Factores estructurales como la incidencia de enfermedades (moniliasis y escoba de bruja), las condiciones ambientales restrictivas y las deficiencias en el manejo agronómico siguen representando barreras críticas para la productividad; en consecuencia, se requiere un enfoque integral que combine prácticas agronómicas mejoradas, acompañamiento técnico constante y estrategias adaptativas para fortalecer la resiliencia de los sistemas cacaoteros tradicionales (Ngaba et al., 2024).



6. CONCLUSIONES

El análisis de correspondencias múltiples (ACM) permitió explicar el 59.75 % de la variabilidad total mediante 18 componentes, lo cual confirma la complejidad multidimensional de los sistemas tradicionales de producción de cacao en Tumaco. Dentro de ese entramado, se identificaron como variables discriminantes clave la producción de cacao seco (PCS), las especies de sombrío (ESPS), la organización comunitaria (ORGC), el registro de actividades (RAC) y la mano de obra (MNO). Estas variables representan factores aislados que reflejan la profunda interacción entre las prácticas de manejo agronómico, las dinámicas organizativas locales y la disponibilidad de recursos humanos, que se consolidan como determinantes esenciales de la productividad de las fincas.

La identificación de esos factores reafirma que la productividad en los sistemas de cacao no es un fenómeno estrictamente agronómico, sino una construcción compleja que emerge de la sinergia entre el conocimiento técnico, la capacidad organizativa y la resiliencia social de las comunidades rurales. Cada finca refleja un entramado dinámico donde prácticas agronómicas, dinámicas comunitarias y saberes tradicionales interactúan para modelar los resultados productivos. En consecuencia, el diseño de estrategias de intervención y fortalecimiento productivo en el sector cacaoero debe incorporar una visión sistémica, al articular mejoras técnicas con procesos sociales, organizativos y de participación comunitaria. Solo mediante este enfoque integrado será posible lograr transformaciones sostenibles en el tiempo, capaces de consolidar la competitividad del cacao de Tumaco sin comprometer los equilibrios territoriales y culturales que sostienen su identidad agrícola.

El análisis de los sistemas de producción de cacao en Tumaco permitió identificar tres tipologías de fincas, que agrupan al 3 %, 12 % y 85 % de las unidades productivas respectivamente, lo cual refleja una marcada desigualdad en términos de rendimiento, manejo agronómico y acceso a recursos. Las fincas Tipo I, con productividades superiores a 1.000 kg/ha/año, se consolidan como modelos de referencia regional gracias a su

manejo tecnificado, densidades óptimas de siembra (~1.000 árboles/ha) y la aplicación sistemática de buenas prácticas agrícolas (BPA). Las fincas Tipo II, con rendimientos intermedios entre 600 y 1.000 kg/ha/año, evidencian un manejo agrícola irregular, afectado por limitaciones técnicas y deficiencias edáficas que restringen su desempeño. Por su parte, las fincas Tipo III, que concentran el 85 % de la muestra, presentan rendimientos inferiores a 600 kg/ha/año y enfrentan restricciones estructurales severas: baja densidad arbórea (200-400 árboles/ha), localización remota, problemas de infraestructura y limitada asistencia técnica, situándolas consistentemente por debajo del promedio nacional de 550 kg/ha/año (MADR, 2007). Esta estructura desigual refleja los desafíos históricos que enfrenta la cacaocultura tradicional de Tumaco, al igual que la urgente necesidad de estrategias diferenciadas de intervención que consideren el contexto agroecológico y social de cada tipología.

Los análisis edafológicos realizados en las diferentes tipologías de fincas evidencian un perfil nutricional subóptimo, caracterizado por deficiencias sistemáticas en elementos esenciales como fósforo (P), potasio (K), azufre (S), boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn). Se observan, de manera preocupante, concentraciones elevadas de hierro (Fe) en los suelos, condición que, en combinación con un deficiente drenaje, puede inducir toxicidad y exacerbar la acidez edáfica, afectando negativamente la dinámica de absorción de nutrientes esenciales (Mahender et al., 2019; López, 2021). Este desbalance mineral limita el desarrollo fisiológico del cultivo de cacao, reduciendo su capacidad de crecimiento radicular, su resistencia a enfermedades y su productividad. Así, el manejo integral de la nutrición del suelo emerge como un componente crítico para cualquier estrategia de sostenibilidad y competitividad en los sistemas tradicionales de cacao en Tumaco.

Los resultados obtenidos en este estudio sugieren que las fincas de cacao en Tumaco tienen el potencial de superar el punto de equilibrio económico establecido en aproximadamente 600 kg/ha/año (Cordeagropaz, 2019) mediante la implementación sistemática de buenas prácticas agrícolas (BPA) y la provisión continua de asistencia técnica especializada.



Las variables que ejercen mayor influencia en la productividad local incluyen la adecuada fertilización, la gestión eficiente de drenajes, la proximidad de las fincas a los centros poblados, el registro detallado de costos e ingresos, la ejecución oportuna de labores culturales y el acceso a apoyo técnico permanente. Dichos factores evidencian que la mejora en los sistemas productivos no puede abordarse de manera aislada, sino que exige intervenciones integrales que respondan simultáneamente a las limitaciones biofísicas y socioeconómicas del territorio. En consecuencia, los hallazgos de esta investigación resaltan el enorme potencial de transformación de la cacaocultura en Tumaco, siempre que se prioricen estrategias adaptadas a las distintas tipologías de finca identificadas y se fomente la adopción progresiva de tecnologías apropiadas y culturalmente pertinentes (Ngaba et al., 2024).

7. RECOMENDACIONES

Con base en el diagnóstico integral de los sistemas de producción de cacao en Tumaco se formulan las siguientes recomendaciones, orientadas a optimizar la productividad, fortalecer la sostenibilidad y promover la resiliencia territorial. Cada propuesta se ajusta de manera diferenciada a las tipologías de finca identificadas y reconoce las particularidades socioeconómicas, edáficas y técnicas de cada grupo.

7.1 Intervención Diferenciada por Tipología de Finca cacaotera

Es imperativo diseñar estrategias de intervención específicas para cada tipo de finca. Para las fincas Tipo I, caracterizadas por rendimientos superiores a 1,000 kg/ha/año, se recomienda consolidar los avances alcanzados mediante el fortalecimiento de la tecnificación existente, la adopción de innovaciones como la polinización asistida, el manejo optimizado de drenajes y la incorporación de planes de fertilización integrales, con énfasis en micronutrientes críticos. En el caso de las fincas Tipo II, con rendimientos entre 600 y 1.000 kg/ha/año, se debe promover el tránsito hacia sistemas de tecnología mediana, reforzar las buenas prácticas agrícolas, aumentar la densidad de siembra y corregir las limitaciones nutricionales identificadas. Para las fincas Tipo III, que representan el 85 % del total y presentan rendimientos inferiores a 600 kg/ha/año, la prioridad es la rehabilitación productiva, la renovación de cacaotales envejecidos con materiales de alto rendimiento y tolerancia a enfermedades, y la implementación de prácticas agroecológicas que mejoren la fertilidad del suelo y reduzcan la dependencia de insumos externos (FAO, 2023). Esta asignación diferenciada de recursos técnicos y financieros permitirá mejorar la competitividad sectorial de manera equitativa y sostenible, conservando el respeto a las condiciones estructurales y culturales de cada tipología.

7.2 Fortalecimiento de Capacidades mediante Asesoría Técnica

Es necesario recomendar la implementación de un programa estructurado de asistencia técnica continua, orientado al fortalecimiento de capacidades de los productores en el manejo integral del cultivo de cacao. Este

programa debe contemplar componentes clave como la poda adecuada, el control fitosanitario oportuno, la fertilización diferenciada según análisis de suelos, y el registro sistemático de actividades y costos de producción. La estrategia de capacitación debe fundamentarse en metodologías participativas que reconozcan y potencien el conocimiento tradicional de los productores, facilitando la apropiación de tecnologías mejoradas y fomentando procesos de aprendizaje colaborativo (Pretty et al., 2020).

La asistencia técnica no debe limitarse a visitas esporádicas, sino constituirse en un acompañamiento permanente, adaptado a los ciclos productivos y a las necesidades particulares de cada tipología de finca. Estudios recientes demuestran que los programas de formación basados en la co-creación de saberes incrementan significativamente la adopción de buenas prácticas agrícolas, fortalecen la resiliencia de los sistemas productivos y mejoran la sostenibilidad económica de las familias rurales (FAO, 2023). De esa manera, un enfoque de asesoría técnica integral y participativa se configura como un pilar fundamental para lograr mejoras sostenidas en la productividad, calidad y competitividad del cacao en Tumaco.

7.3 Rehabilitación y Renovación de Plantaciones de Cacao

También se recomienda implementar un programa de rehabilitación y renovación de plantaciones de cacao, orientado a intervenir árboles viejos e improductivos a través de podas de rehabilitación o, en casos críticos, la resiembra total con materiales genéticos de alta calidad. Se sugiere utilizar clones regionales certificados, seleccionados por su tolerancia a enfermedades prevalentes como la moniliasis (*Moniliophthora roreri*) y la escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*), así como por su potencial de rendimiento superior a 1.500 kg/ha/año (Fedecacao, 2023).

La estrategia debe priorizar el incremento de la densidad de siembra hacia rangos óptimos de 800 a 1.000 árboles por hectárea, ajustando las condiciones de sombrero a niveles de cobertura de entre el 30 % y el 50 %, conforme con las recomendaciones agroecológicas para maximizar la fotosíntesis y la producción de biomasa. Esta renovación estructural debe complementarse con un manejo agronómico riguroso, basado en prácticas

como la poda formativa y de mantenimiento, el control fitosanitario sistemático y la aplicación de fertilización racional según diagnóstico de suelos. De esta manera, la rehabilitación contribuirá a incrementar la productividad y rentabilidad del cultivo, al igual que permitirá avanzar hacia sistemas agroforestales más resilientes y sostenibles en el tiempo.

7.4 Investigación sobre Toxicidad por Hierro en Fincas Cacaotera

Otra recomendación es llevar a cabo investigaciones experimentales orientadas a evaluar el impacto de los elevados niveles de hierro (Fe) detectados en los suelos cacaoteros de Tumaco sobre la productividad, la calidad del grano y la salud fisiológica de los cultivos. Estos estudios deberán abordar de manera específica la interacción del hierro con la acidez del suelo y su efecto en la disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo (P), el potasio (K) y el zinc (Zn), elementos críticos para el óptimo desarrollo del cacao (Mahender et al., 2019).

Igual, se sugiere la implementación de ensayos de manejo adaptativo en campo, que incluyan prácticas como la mejora de los sistemas de drenaje interno para evitar encharcamientos prolongados, así como el uso estratégico de enmiendas calcáreas para elevar el pH y reducir la solubilidad excesiva del hierro. El objetivo final de esta investigación aplicada será establecer umbrales críticos de tolerancia al Fe en los sistemas agroforestales de cacao, además, generar recomendaciones prácticas que permitan mitigar los efectos fitotóxicos, mejorar la fertilidad edáfica y optimizar la resiliencia de las plantaciones.

7.5 Determinación del Punto de Equilibrio Específico

Para ese fin, es necesario realizar el cálculo detallado del punto de equilibrio económico para las fincas cacaoteras de Tumaco, previa incorporación de los costos reales de producción: insumos agrícolas, mano de obra (familiar y contratada), transporte terrestre y fluvial, costos de beneficio y comercialización del grano seco. Esta estimación debe considerar la



variabilidad de los precios locales del cacao y las dinámicas de mercado asociadas a la calidad y certificaciones diferenciales.

El establecimiento de un punto de equilibrio actualizado, segmentado por tipologías de finca, permitirá a los productores y organizaciones cacaoteras definir metas productivas viables (por ejemplo, entre 600-800 kg/ha/año), mejorar la toma de decisiones de inversión, evaluar el impacto de las tecnologías adoptadas, y orientar sus esfuerzos hacia la maximización de la rentabilidad (Cordeagropaz, 2019). También, este ejercicio contribuirá a elaborar una planificación financiera precisa, que promueva la sostenibilidad económica de las explotaciones y facilite el acceso a esquemas de crédito rural e incentivos de productividad.

7.6 Uso de Biopreparados y Abonos Orgánicos

Para ello, se recomienda fomentar la adopción de biopreparados, tales como compost, vermicompost, biofertilizantes minerales y microorganismos eficientes, como estrategia de remediación nutricional en los suelos de las fincas cacaoteras, por cuanto estas prácticas permiten corregir deficiencias de nutrientes críticos como fósforo (P), azufre (S), boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn), a costos considerablemente más bajos en comparación con los fertilizantes sintéticos.

El uso de abonos orgánicos, además de restaurar la fertilidad edáfica, contribuye a mejorar la estructura del suelo, la capacidad de retención de agua y la actividad biológica del ecosistema edáfico, factores esenciales para la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas de producción tradicionales (Fundación Suyusama, 2021). Esta estrategia es viable en contextos de bajos ingresos como Tumaco, donde la limitada capacidad de inversión impide el acceso regular a insumos industriales.

La implementación de programas de capacitación en producción y aplicación de biopreparados también fortalecerá la autonomía productiva de las comunidades cacaoteras, reduciendo su dependencia de insumos externos y alineándolas con principios de manejo agroecológico, resiliencia climática y certificación de sostenibilidad (Ngaba et al., 2024).

8. REFERENCIAS

- Abbott, P. C., Benjamin, T. J., Burniske, G. R., Croft, M. M., Fenton, M. R., Kelly, R. R., Lundy, M., Rodriguez-Camayo, C., & Wilcox, M. D. (2018). Análisis de la cadena de suministro de cacao en Colombia. USAID. https://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1862/Analisis_Cadena_Suministro_Cacao_Colombia.pdf
- Agencia para la Reincorporación y la Normalización. (2023). Cacao para la paz: Impacto de los cultivos lícitos en la reincorporación y el desarrollo rural. Autor. https://www.reincorporacion.gov.co/es/informes/cacao_paz_2023.pdf
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). Agroecology and the design of resilient farming systems. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429282690>
- Alvafritz, R., & Hertel, D. (2023). Litter dynamics and nutrient cycling in tropical forests. *Journal of Tropical Ecology*, 39(1), 112–125. <https://doi.org/10.1017/S026646742300001X>
- Anderson, J. M., & Ingram, J. S. I. (1993). Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods (2nd ed.). CAB International.
- Angulo, N. (1992). Evaluación de los sistemas productivos de los ríos: Mejicano, Gualajo, Tablones, Rosario y Chagüí, municipio de Tumaco, Nariño [Tesis de grado, Universidad de Nariño]. Facultad de Ciencias Económicas.
- Arbelaitz, O., Gurrutxaga, I., Muguerza, J., Pérez, J.M., Perona, I. (2013). An extensive comparative study of cluster validity indices, *Pattern Recognition*, Volume 46, Issue 1, Pages 243-256. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.07.021>.

- Ballesteros, W., Navia, J. F., & Leonel, H. F. (2024). Métodos para la identificación, caracterización y tipificación de sistemas agroforestales en el trópico. Editorial Universidad de Nariño.
- Bertalanffy, L. von. (1968). General system theory: Foundations, development, applications. George Braziller.
- Borderías, M. P., & Muguruza, C. (2014). Sistemas complejos en procesos agrícolas: Una visión integrada. En Evaluación de impacto ambiental (pp. 45-67). Universidad de Granada.
- Boyer, J. (1973). Nutrient cycling in cocoa ecosystems in Cameroon. *Tropical Agriculture*, 50(3), 201–210.
- Bymolt, R., Laven, A., & Tyszler, M. (2018). Demystifying the cocoa sector in Ghana and Côte d'Ivoire. KIT Royal Tropical Institute. <https://www.kit.nl/publication/demystifying-cocoa-sector-ghana-cote-divoire/>
- Cabral, J., Faria, D., & Morante-Filho, J. C. (2021). Landscape composition is more important than local vegetation structure for understory birds in cacao agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 481, Article 118704. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118704>
- Carmona-Rojas, M., Sánchez, J., & Pérez, A. (2022). Nutrient demands of mature cocoa trees in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 96(4), 567–578. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00723-6>
- Casierra-Posada, F., & Poveda, J. (2005). La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y los carbohidratos solubles en plantas. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 22(2), 45-56.

- Castillo, G., Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2012). Agroecosistemas: Sistemas dinámicos en interrelación biofísica y socioeconómica. En *Agroecología: Principios y estrategias para diseñar sistemas agrícolas sostenibles* (pp. 15-30). EcoHabitar.
- Chen, Y., Zhang, X., & Wang, L. (2023). Microbial diversity and decomposition rates in humid tropical soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 178, Article 108945. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108945>
- Cordeagropaz. (2015). Diagnóstico de sistemas de producción de cacao en Tumaco. Documento no publicado.
- Cordeagropaz. (2019). Diagnóstico socioeconómico y productivo de 300 familias cacaoteras, municipio de Tumaco. Sin publicar.
- Dunn, J. C. (1974). "Well-Separated Clusters and Optimal Fuzzy Partitions". *Journal of Cybernetics*, 4(1), 95-104. doi:10.1080/01969727408546059
- Escalante, E., Mora, J., & Rivera, L. (2013). Nutrient release patterns in tropical agroforestry systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(2), 345-356.
- Escobar, G., & Berdegué, J. A. (1990). Conceptos y metodologías para tipificación de sistemas de finca: La experiencia de RIMISP. RIMISP - Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural.
- Espinal, C., Martínez, H., & Ortiz, L. (2005). La cadena del cacao en Colombia: Una mirada global de su estructura y dinámica. Observatorio de Agrocadenas, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Espinosa-Álzate, J. A., & Ríos-Osorio, L. A. (2016). Caracterización de sistemas agroecológicos para el establecimiento de cacao (*Theobroma cacao* L.) en comunidades afrodescendientes del Pacífico colombiano (Tumaco-Nariño, Colombia). *Acta Agronómica*, 65(3), 211-217. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n3.50714>



- Fahad, S., Chavan, S. B., & Chintala, R. (2022). Agroforestry systems for soil health and climate resilience. *Agroforestry Systems*, 96(3), 451–463. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00712-9>
- FAO. (2023). *Agricultural production systems: Concepts and approaches for sustainable development*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/publications/agricultural-systems-2023/en>
- Fay, P. A., Carlisle, J. D., & Knapp, A. K. (2003). Productivity responses to altered rainfall patterns in a C4-dominated grassland. *Oecologia*, 137(2), 245–251. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1331-3>
- Federación Nacional de Cacaoteros. (2015). *Sistemas agroforestales con cacao: Una alternativa sostenible*. Autor. https://www.fedecacao.com.co/sites/default/files/Sistemas_Agroforestales_Cacao_2015.pdf
- Federación Nacional de Cacaoteros. (2018). *Informe de ejecución: Plan de ingresos, inversiones y gastos del Fondo Nacional del Cacao*. Autor. <https://www.fedecacao.com.co/informes>
- Federación Nacional de Cacaoteros. (2023). *Reporte de avances en la caocultura colombiana: 2020-2023*. Autor. https://www.fedecacao.com.co/sites/default/files/Reporte_2023.pdf
- Federación Nacional de Cacaoteros. (2024). *Producción de cacao en el primer trimestre de 2024*. Autor. <https://www.fedecacao.com.co/economia-nacional>
- Federación Nacional de Cacaoteros. (2025). *Producción consolidada de cacao 2024*. Autor. <https://www.fedecacao.com.co/estadisticas-2024>
- Ferro, G., & Meneses, R. (1996). Sostenibilidad económica en sistemas integrales de producción. *Revista de Agricultura Tropical*, 10(3), 78-90.

- Fundación Suyusama. (2021). Manual de fertilización orgánica para cultivos tropicales. Documento no publicado.
- García, A. (1998). Síntomas de deficiencia y toxicidad de nutrientes en plantas. En *Nutrición vegetal* (pp. 120-145). Editorial Agrícola.
- Gutiérrez-Vásquez, J., Pérez, J., & Morales, R. (2012). Litterfall rates in Pinus plantations in Colombia. *Forest Science*, 58(4), 412–420.
- Halkidi, M., Batistakis, Y. & Vazirgiannis, M. (2001). On Clustering Validation Techniques. *Journal of Intelligent Information Systems* 17, 107–145. <https://doi.org/10.1023/A:1012801612483>
- Harper, C. W., Blair, J. M., & Fay, P. A. (2005). Drought and root biomass responses in grasslands. *Plant and Soil*, 275(1-2), 153–162. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-1029-8>
- Hidalgo, R., Sánchez, J., & Pérez, A. (2014). Tipificación de sistemas de producción de cacao en Colombia. *Revista de Investigación Agraria*, 9(3), 45-58.
- Horngren, C. T., Datar, S. M., & Rajan, M. V. (2012). *Cost accounting: A managerial emphasis* (14th ed.). Pearson Education.
- ICRAF. (2024). Annual Report 2024. World Agroforestry Centre.
- IDEAM. (2020). Climatic report for Tumaco region, 2020. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- International Cocoa Organization. (2023). *Cacao fino y de aroma en América Latina: Perspectivas y desafíos*. Autor. https://www.icco.org/wp-content/uploads/2023_Fine_Cocoa_Latin_America.pdf
- International Cocoa Organization. (2024). Boletín trimestral de estadísticas del observatorio de commodities: Cacao. Boletín N° 10-1. <https://www.icco.org/statistics/>

Intagri. (2008). Deficiencia de zinc en plantas. Autor. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/deficiencia-de-zinc-en-plantas>

José, S. (2012). Agroforestry for conserving and providing ecosystem services in agricultural landscapes. *International Journal of Agroforestry and Silviculture*, 1, 1-9.

Li, J., Wang, Q., & Zhang, Y. (2024). Organic amendments and soil carbon restoration in tropical agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 361, Article 108723. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108723>

López, A. (2021). Toxicidad por hierro en suelos cacaoteros. *Revista de Agricultura Tropical*, 15(3), 89-102.

López, N.R.E. & S.V.A Lucas (2018). Efecto de la fertilización con N, S, micronutrientes y fitoreguladores sobre el rendimiento y rentabilidad del cacao Nacional en el valle del Río Carrizal. Ing. Thesis. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta, Ecuador. pp. 38-54.

Lora, J. (2001). Deficiencia de zinc en cacao: Síntomas y corrección. *Revista de Cacaocultura*, 8(2), 45-60.

Luna-Romera, J.M., del Mar Martínez-Ballesteros, M., García-Gutiérrez, J., Riquelme-Santos, J.C. (2016). An Approach to Silhouette and Dunn Clustering Indices Applied to Big Data in Spark. In: Luaces, O., et al. *Advances in Artificial Intelligence. CAEPIA 2016. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 9868. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44636-3_15

MADR. (2007). Cadena productiva del cacao en Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

- Mahender, A., Swain, S., & Pandey, A. (2019). Iron toxicity and its management in acidic soils: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(4), 789-802. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00089-4>
- Malagón, C. (2001). El componente biótico en los agroecosistemas. En *Agroecología y sostenibilidad* (pp. 78-95). Editorial Universitaria.
- Mantilla, J., Argüello, A. L., & Méndez, H. (2000). Caracterización y tipificación de los productores de cacao del departamento de Santander. Corpoica.
- Mantilla, J. (2002). Erosión y toxicidad en suelos de ladera. *Revista Colombiana de Suelos*, 8(2), 45-56.
- Marschner, H. (2003). *Mineral nutrition of higher plants* (2nd ed.). Academic Press.
- Martínez, A. (2013). Historia de las redes de investigación en sistemas de producción agropecuarios en América Latina. En *Tipificación y caracterización* (pp. 10-25). RIMISP.
- Mata, R., et al. (2022). Agroforestry systems in Brazil: Resilience ecological and sustainability. *Agroforestry Systems*, 96(5), 789-802. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00745-0>
- Mata, D., Rivero, M., & Segovia, E. (2018). Sistemas agroforestales con cultivo de cacao fino de aroma: Entorno socioeconómico y productivo. *Revista Brasileira de Agroecología*, 6(1), 103-115.
- Meyers, P. J. (2021). Cacao. *Foresight*. <https://www.foresight.com/cacao-report-2021>

- Montoya-Restrepo, I. A., Montoya-Restrepo, L. A., & Lowy Cerón, P. D. (2015). Oportunidades para la actividad cacaotera en el municipio de Tumaco, Nariño, Colombia. *Entramado*, 11(1), 48-59. <https://doi.org/10.18041/entramado.2015v11n1.21107>
- Mora, L. (2019). *Gestión financiera y contabilidad de costos*. Editorial Universidad del Valle.
- Muchaweti, M., Birkhofer, K., Zmutara, E., Chinyanga, F., Zahn, A., & Goldhaber-Fiebert, J. D. (2006). Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(1), 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.028>
- Nair, P. K. R. (1985). Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 3(2), 97-128. <https://doi.org/10.1007/BF00139638>
- Nair, P. K. R. (1993). *An introduction to agroforestry*. Kluwer Academic Publishers.
- Navarro-Pedreño, J., Almendro-Candel, M. B., & Zorpas, A. A. (2021). Organic residue management and soil carbon dynamics. *Sustainability*, 13(11), Article 6234. <https://doi.org/10.3390/su13116234>
- Ngaba, M., Lambert, R., & Torquebiau, E. (2024). Agroforestry as a sustainable farming system: Soil quality benefits. *Sustainability*, 16(2), 678-692. <https://doi.org/10.3390/su16020678>
- Ngo Bieng, M. A., Vaast, P., Van Noordwijk, M., Giller, K. E., & Garcia, C. (2013). Tree architecture in a tropical agroforestry system: Functional relationships with growth. *Botany*, 91(7), 460-469. <https://doi.org/10.1139/cjb-2013-0007>

- Onyango, C. M., Nyaga, J. M., & Wetende, E. (2020). Effects of waterlogging on growth and yield of cacao (*Theobroma cacao* L.) in tropical environments. *Agricultural Water Management*, 241, Article 106342. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106342>
- Ortiz, R. (2009). Lignin effects on litter decomposition in tropical species. *Tropical Ecology*, 50(2), 189–197.
- Ospina, A. A. (2004). Clasificación y caracterización de tecnologías agroforestales. En A. A. Ospina (Ed.), *Agroforestería en Latinoamérica* (pp. 21-40). AGRUCO.
- Peña, J. A., et al. (2007). Sistemas de producción agrícola: Enfoque secuencial y estratégico. En *Agricultura integral* (pp. 50-70[EUDN1.1][U1.2]). Editorial Agrícola.
- Pinto, L. F., Almeida, J., & Santos, R. (2007). Tree density and nitrogen cycling in cacao agroforests. *Agroforestry Systems*, 71(2), 89–97. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9082-5>
- Powers, J. S., Montgomery, R. A., & Adair, E. C. (2009). Decomposition rates and lignin content in tropical forests. *Ecology*, 90(8), 2090–2100. <https://doi.org/10.1890/08-1489.1>
- Preciado, O., Ocampo, C. I., & Ballesteros, W. (2011). Caracterización del sistema tradicional de producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en seis núcleos productivos del municipio de Tumaco, Nariño. *Revista de Investigación Agraria*, 5(2), 10-11.
- Pretty, J., Benton, T. G., & Bharucha, Z. P. (2020). Participatory approaches to sustainable agriculture: A global perspective. *Nature Sustainability*, 3(6), 456-465. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0523-1>
- Proyecto Biopacífico. (1998). Proyecto para la conservación de la biodiversidad del Chocó biogeográfico. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - Fondo para el Medio Ambiente Mundial.

- Puentes-Páramo, Y. J., Torres, J., & Ramírez, C. (2014). Phosphorus dynamics in tropical soils under agroforestry. *Soil Science*, 179(6), 287–295. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000063>
- Ramírez, J. A., Sigarroa Rieche, A. K., & Del Valle Vargas, R. A. (2014). Characterization of cacao (*Theobroma cacao* L.) farming systems in the Norte de Santander Department and assessment of their sustainability. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7177-7187. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42635>
- Ramos, L. A., Silva, M. C., & Oliveira, P. R. (2023). Biomass decomposition of *Cedrela odorata* and *Carapa guianensis* in cocoa agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 529, Article 120678. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120678>
- Razo-Zárate, R., Sánchez, M., & Gómez, L. (2013). Litterfall and tree age in agroforestry systems. *Agrociencia*, 47(5), 489–498.
- Rice, R. A., & Greenberg, R. (2000). Cacao cultivation and the conservation of biological diversity. *Ambio*, 29(3), 167-173. [https://doi.org/10.1639/0044-7447\(2000\)029\[0167:CCATCO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1639/0044-7447(2000)029[0167:CCATCO]2.0.CO;2)
- Ríos, G., et al. (2004). Zonificación, caracterización y tipificación de los sistemas de producción de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) en el Eje Cafetero. *Revista de Investigación Agraria*, 14(2), 120-135.
- Rojas, C. A., Sánchez, J. M., & Ortiz, D. (2017). Biomass decomposition and nutrient release in Colombian agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 91(6), 1053–1065. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9982-4>
- Rodriguez, G., Gil, J., & García, E. (1996). Metodología de la investigación cualitativa.[EUdN2.1][U2.2] Editorial Aljibe, 207 p.

- Salgado-Mora, M. G., Ramírez, F., & Castro, L. (2009). Nutrient composition in cacao agroforestry systems. *Journal of Tropical Agriculture*, 47(1), 34–42.
- Sánchez, F., Ortiz, R., & Villareal, M. (2005). Lignin and microbial effects on decomposition in tropical species. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(8), 1456–1463. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.01.012>
- Sarandón, S. J. y Flores, C. C. (2014). Agroecología: Un enfoque para el diseño de sistemas agrícolas sustentables. En *Biodiversidad, agroecología y agricultura sustentable* (pp. 10-25). Sarandón, S. J. y Flores, C. C (eds), Editorial INTA.
- Sauvadet, M., Saj, S., & Harmand, J. M. (2019). Litter decomposition and microbial activity in coffee agroforestry systems. *Plant and Soil*, 445(1-2), 385–399. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04302-5>
- Silva, I. R. (2007). Fitotoxicidad por manganeso en plantas: Efectos y mecanismos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 24(1), 56-70.
- Siti, N. A., Ahmad, A., & Zuhlilmi, M. (2024). Phosphorus mineralization in tropical agroforestry soils. *Soil Use and Management*, 40(1), 123–134. <https://doi.org/10.1111/sum.12945>
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., & Porras, G. (2018). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 258, 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.018>
- Somarriba, E., López-Sampson, A., & Cerda, R. (2021). Biomass decomposition and nutrient dynamics in cocoa-based agroforestry systems with *Cedrela odorata*. *Forest Ecology and Management*, 498, Article 119532. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119532>



- Suárez, J. (2018). Productividad del cacao en Santander: Lecciones para el Pacífico colombiano. *Revista Colombiana de Agricultura*, 13(2), 67-80.
- Todeschini, R., Ballabio, D., Termopoli, V., Consonni, V. (2024). Extended multivariate comparison of 68 cluster validity indices. A review, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 251, 105117, <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2024.105117>.
- Universidad Nacional de Colombia. (2024). Cacaoteros y transformadores de cacao de Tumaco reciben asistencia técnica especializada de la UNAL. Agencia de Noticias UNAL.
- Valerio, D., García, A., Acero, R., Perea, J., Castaldo, A., & Martos, J. (2004). Metodología para la caracterización y tipificación de sistemas ganaderos. Universidad de Córdoba. https://www.uco.es/zootecniay-gestion/documentos/dt_2004_tipificacion.pdf
- Valerio, D., García, A., Perea, J., Acero, R., Martos, J., & Romero, L. (2022). Advances in the characterization of agricultural production systems: Methodologies and applications. *Agronomy Journal*, 114(5), 2456-2470. <https://doi.org/10.1002/agj2.21053>
- Vivar, I. (2013). Toxicidad por manganeso en plantas: Síntomas y corrección en suelos ácidos. *Revista de Suelos Tropicales*, 19(2), 78-90.
- von Liebig, J. (1840). *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie*. F. Vieweg und Sohn.
- World Bank. (2024). Commodity Markets Outlook: Cocoa and coffee prices rebound on renewed supply concerns. Autor. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/39600>
- World Bank. (2024). Commodity Markets Outlook – October 2024: Coffee and cocoa prices rebound on renewed supply concerns. The World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstreams/6a83f625-3b89-4934-a6b4-fc0734d78faf/download>

9. ANEXOS

Anexo 1. Variables evaluadas para la tipificación de las fincas productoras de cacao en el municipio de Tumaco.

| Variable | Código | Modalidad |
|---|--------|--------------------------------------|
| Área total de la finca (AF) | 1 | 1 - 3 ha ⁻¹ |
| | 2 | 3.5 - 6 ha ⁻¹ |
| | 3 | >7 ha ⁻¹ |
| Área en cacao (ACC) | 1 | 1 - 3 ha ⁻¹ |
| | 2 | 3.5 - 6.5 ha ⁻¹ |
| | 3 | > 7 ha ⁻¹ |
| Densidad de siembra (DS) | 1 | <625 plantas/ha ⁻¹ |
| | 2 | 626 - 1.111 plantas/ha ⁻¹ |
| | 3 | >1.111plantas/ha ⁻¹ |
| Tenencia de la tierra (TT) | 1 | Propia |
| | 2 | Arrendada |
| | 3 | Herencia |
| | 4 | Otra |
| Edad de los cultivos de cacao (ECC) | 1 | < 18 años |
| | 2 | 19 - 50 años |
| | 3 | 51 - 65 años |
| | 4 | > 66 años |
| Producción de cacao seco (PCS) | 1 | < 300 kg/ha ⁻¹ |
| | 2 | 301 - 600 kg/ha ⁻¹ |
| | 3 | 601 a-1000 kg/ha ⁻¹ |
| | 4 | > 1001 kg/ha ⁻¹ |
| Costos de producción por hectárea (CPH) | 1 | <\$3.5 millones |
| | 2 | \$3.5 - \$7 millones |
| | 3 | >\$7 millones |
| Relación costo-beneficio (RCB) | 1 | Positiva |
| | 2 | Negativa |



| Variable | Código | Modalidad |
|---|--------|-------------------------------------|
| Mano de obra (MNO) | 1 | Familiar |
| | 2 | Contratada |
| | 3 | Ambos |
| Dependencia de insumos externos (DIE) | 1 | Alta |
| | 2 | Media |
| | 3 | Baja |
| Origen de los recursos de inversión (ORI) | 1 | Propia |
| | 2 | Productor Donación y crédito |
| | 3 | Productor y crédito |
| | 4 | Donación |
| Actividades diferentes a las de la finca (ADAF) | 1 | Contratista |
| | 2 | Jornalero |
| | 3 | Constructor |
| | 4 | Otros |
| Características Ambiental | | |
| Área en bosque (ARB) | 1 | <2 ha ⁻¹ |
| | 2 | 2 - 3 ha ⁻¹ |
| | 3 | >3.5 ha ⁻¹ |
| Especies de sombrío (ESPS) | 1 | Plátano + frutales |
| | 2 | Forestales |
| | 3 | Frutales y forestales |
| | 4 | Ninguna |
| Uso de las especies (USE) | 1 | Autoconsumo |
| | 2 | Venta |
| | 3 | Intercambio por labores en la finca |
| Manejo del sombrío (MSO) | 1 | Podas de formación |
| | 2 | Poda de realce |
| | 3 | Otras |

| Variable | Código | Modalidad |
|---|---------------|--|
| Topografía de la finca (TFI) | 1 | Plano o vega |
| | 2 | Colina moderada |
| | 3 | Lomas con pendiente mayor a 10 % |
| Características Técnicas de Manejo | | |
| Tecnología y gestión | | |
| Variedades cacao (VARC) | 1 | Cacao criollo |
| | 2 | CCN 51 |
| | 3 | CCN 51+ ICS 95 |
| | 4 | CCN 51+ ICS95 + CACAO Criollo+ Otras variedades |
| | 5 | Otros |
| Tipo de poda (ACP) | 1 | Poda de formación |
| | 2 | Poda de mantenimiento |
| | 3 | Poda de rehabilitación |
| Control de malezas en el año (CM) | 1 | 3 veces año |
| | 2 | 4 veces año |
| | 3 | 6 veces año |
| Control de enfermedades (CENF) | 1 | Reconoce enfermedades y realiza actividades de acuerdo con el PMIE |
| | 2 | Reconoce algunas enfermedades y el manejo es parcial |
| | 3 | No reconoce las enfermedades |
| Periodicidad del control fitosanitario (PCFS) | 1 | Cada 8 días |
| | 2 | Cada 15 días |
| | 3 | Cada mes |
| | 4 | Cuando cosecha |
| | 5 | No realiza |



| Variable | Código | Modalidad |
|--|---------------|--|
| Venta del grano de cacao seco (VGCS) | 1 | Organización en la vereda |
| | 2 | Comercializadora en cabecera municipal |
| | 3 | Intermediario |
| Registro de actividades y costos (RAC) | 1 | De actividades agronómica en la finca |
| | 2 | De producción |
| | 3 | De reinversión en la finca |
| | 4 | Ninguno |
| Características sociales | | |
| Familiar | | |
| Género (GEN) | 1 | Masculino |
| | 2 | Femenino |
| Edad (ED) | 1 | <18 años |
| | 2 | Entre 18 y 50 años |
| | 3 | Entre 50 y 65 años |
| | 4 | >De 65 años |
| Composición familiar (CFAM) | 1 | 1 y 5 personas |
| | 2 | 6 y 8 personas |
| | 3 | > 9 personas |
| Grado de escolaridad (GESC) | 1 | Bachiller o más |
| | 2 | Entre 4 y 9 año de escolaridad |
| | 3 | < 3 año de escolaridad |

| Variable | Código | Modalidad |
|---|--------|----------------------------|
| Características sociales | | |
| Servicio de asesoría técnica recibida (ATYTT) | 1 | Fedecacao |
| | 2 | Epsagro |
| | 3 | Alcaldía de Tumaco - Umata |
| | 4 | Sena |
| | 5 | Agrosavia |
| | 6 | Programa de cooperación |
| | 7 | Asociación de agricultores |
| Organización comunitaria (ORGC) | 1 | Sí |
| | 2 | No |
| Participación en capacitación (PCAP) | 1 | Constantemente |
| | 2 | Esporádicamente |
| | 3 | Nunca |
| Distancia a la finca (DIST) | 1 | <1 km |
| | 2 | Entre 1.5 a 4.5 km |
| | 3 | >5 km |

Fuente: Investigación



LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Punto de equilibrio calculado a la fecha de realizar este estudio | 42 |
| Figura 2. Localización de las zonas de muestreo en el municipio de Tumaco, Nariño | 60 |
| Figura 3. Flujograma metodológico de la investigación para la tipificación de fincas cacaoteras en el municipio de Tumaco, Nariño | 62 |
| Figura 4. Contribución de las variables a los diferentes ejes: A) Aporte de las variables a los ejes 1 y 2; B) Aporte de las variables a los ejes 2 y 3 | 77 |
| Figura 5. Agrupamiento de los sistemas tradicionales de producción de cacao en Tumaco | 78 |
| Figura 6. Análisis de nutrientes en las fincas tipos I, II y III | 109 |
| Figura 7. Elementos nutricionales de las fincas tipo I, II y III | 112 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Consejos comunitarios y veredas como zonas para la investigación en el municipio de Tumaco, Nariño | 61 |
| Tabla 2. Distribución de los estratos de acuerdo y la varianza encontrada | 64 |
| Tabla 3. Distribución de la muestra en los diferentes estratos | 65 |
| Tabla 4. Métodos de validación de los clústeres | 68 |
| Tabla 5. Porcentaje de la varianza explicada por cada uno de los componentes principales derivados del ACM: | 74 |
| Tabla 6. Variables con mayor contribución a la inercia de los componentes | 74 |
| Tabla 7. Contribución significativa de las diferentes modalidades de las variables a la conformación de clústeres | 79 |

èditorial

Universidad de **Nariño**

Año de publicación: 2026
San Juan de Pasto - Nariño - Colombia

El libro *“Tipificación de Sistemas de Producción Tradicionales de Cacao en Tumaco, Nariño: Un Enfoque para la Sostenibilidad y Competitividad del Sector Cacaotero”* constituye un aporte relevante al estudio de la agroforestería tropical y al fortalecimiento de la cacaocultura en el Pacífico nariñense. La obra se desarrolla en un contexto territorial complejo, con un sistema productivo afectado por limitaciones estructurales como el conflicto armado, la pobreza rural y la presencia de economías ilícitas, pero también por los materiales regionales con alto potencial productivo de un cacao fino de aroma reconocido en mercados internacionales.

En el escenario cacaotero de alta volatilidad de los precios, el libro cobra especial importancia al proponer estrategias para transformar sistemas tradicionales en modelos productivos más sostenibles, resilientes y competitivos. Su enfoque trasciende la descripción de los sistemas existentes y se orienta hacia la generación de herramientas útiles para la toma de decisiones en procesos de desarrollo rural.

Metodológicamente, la obra se sustenta en el uso del Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM), integrando variables biofísicas y socioeconómicas. Este enfoque permite clasificar las fincas en tres tipologías según su nivel de productividad: Tipo I (más de 1.000 kg/ha/año), Tipo II (entre 600 y 1.000 kg/ha/año) y Tipo III (menos de 600 kg/ha/año). Esta tipificación facilita la comprensión de la heterogeneidad productiva y constituye una herramienta aplicable a otros contextos tropicales.

Uno de los principales aportes del libro es su enfoque participativo y holístico, que involucra a los productores en el diagnóstico y diseño de estrategias, fortaleciendo la apropiación del conocimiento y aumentando la viabilidad de su implementación. Asimismo, ofrece recomendaciones técnicas concretas orientadas a la rehabilitación de sistemas productivos con cacao, el manejo nutricional, incluyendo el uso de fertilizantes orgánicos, y la atención a limitantes edáficas como la toxicidad por hierro y aluminio en suelos arcillosos.

En conjunto, el libro presenta un enfoque integral que articula rigor científico, pertinencia territorial y conocimiento local. Se consolida como una referencia clave para investigadores, productores y formuladores de políticas interesados en el desarrollo sostenible de la cacaocultura en regiones tropicales, contribuyendo al mejoramiento de las condiciones de vida rural y a la consolidación de sistemas agroforestales más resilientes.

ISBN: 978-628-7864-70-2



9 786287 864702



Universidad de Nariño
FUNDADA EN 1904



Universidad de Nariño
ACREDITADA EN ALTA CALIDAD
RESOLUCIÓN MEN 000022 - ENERO 11 DE 2023

editorial
Universidad de Nariño