

**ANÁLISIS DE LA COMPLEJIDAD DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE
CACAO (THEOBROMA) EN EL TOLIMA UTILIZANDO MÉTODOS DE
INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

Denys Yohana Mora Herrera
Doctoranda

Orlando Zúñiga Escobar
Director

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES
SANTIAGO DE CALI, VALLE DEL CAUCA
2022

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO 1. CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD, SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS Y EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CACAO.....	16
1.1. Ciencias de la Complejidad	16
1.2. Sistemas Complejos Adaptativos.....	21
1.3. Los Sistemas de Producción Agrícola como Sistemas Complejos.....	24
1.4. Sistema de Producción de Cacao como Sistema Complejo.....	25
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y MÉTODOS.....	30
2.1. Fase 1: Preparación y Planificación.....	30
2.1.1. Área de Estudio	30
2.1.2. Selección de Fincas	34
2.1.3. Instrumentos para Capturar Información	34
2.2. Fase 2: Recolección de Información.....	35
2.2.1. Información del Subsistema Suelo-cultivo	36
2.2.2. Información del Subsistema Socioeconómico	36
2.2.3. Información del Subsistema Calidad de cacao.....	36
2.3. Fase 3: Procesamiento de Datos	38
2.3.1. Lógica Difusa	38
2.3.2. Modelación Basada en Agentes (MBA).....	42
2.4. Fase 4: Retroalimentación	45
2.5. Fase 5: Conclusión.....	46
CAPÍTULO 3. DIAGNÓSTICO DE LA COMPLEJIDAD DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CACAO EN TRES ZONAS DEL TOLIMA	48
3.1. Concepción Teórica de los Subsistemas Suelo-Cultivo, Socioeconómico y de Calidad de Cacao	48
3.1.1. Diseño Teórico del Índice Propuesto para el Subsistema Suelo-Cultivo	48
3.1.2. Diseño Teórico del Índice Propuesto para el Subsistema Socioeconómico ...	54
3.1.3. Diseño Teórico del Índice Propuesto para el Subsistema Calidad de Cacao .	57
3.2. Modelación en GeoFIS	61

3.2.1.	Paso 1: De los Datos Brutos a Grados de Satisfacción.....	61
3.2.2.	Paso 2: Agregación de Variables. Operadores de Agregación.....	62
3.2.3.	Paso 2: Agregación de Variables. Conclusiones de Regla	64
3.3.	Comportamiento y Resultados Matemáticos de los Subsistemas Suelo-Cultivo, Socioeconómico y Calidad de Cacao.....	66
3.3.1.	Resultados del Subsistema Suelo- Cultivo.....	67
3.3.2.	Resultados del Subsistema Socioeconómico	81
3.3.3.	Resultados del Subsistema de Calidad de Cacao.....	95
3.4.	Índice de Complejidad de los Sistemas de Producción de Cacao en Tres Zonas del Tolima.....	112
3.4.1.	Índice de Complejidad de los Sistemas de Producción de Cacao en Chaparral	112
3.4.2.	Índice de Complejidad de los Sistemas de Producción de Cacao en Mariquita	113
3.4.3.	Índice de Complejidad de los Sistemas de Producción de Cacao en Ortega	114
	Conclusión de Capítulo.....	115
CAPÍTULO 4. IDENTIFICACIÓN DE PRIORIDADES ESTRATÉGICAS PARA LA COMPLEJIDAD DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CACAO EN TRES ZONAS DEL TOLIMA		117
4.1.	Prioridades a Nivel del Subsistema Suelo- Cultivo	117
4.2.	Prioridades a Nivel del Subsistema Socioeconómico.....	126
4.3.	Prioridades a Nivel del Subsistema Calidad de Cacao	135
	Conclusión de Capítulo.....	144
CAPÍTULO 5. DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN PARA DINAMIZAR LOS FACTORES LIMITANTES DE LA COMPLEJIDAD DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CACAO EN TRES ZONAS DEL TOLIMA		148
5.1.	Protocolo ODD: Descripción General del Modelo.....	148
	Propósito.....	148
	Entidades, Variables de Estado y Escalas	149
	Descripción General de los Procesos y Programación.....	150
5.2.	Protocolo ODD: Conceptos de Diseño	150
	Principios Básicos	150

Emergencia.....	150
Adaptación	151
Objetivos	152
Interacción.....	152
Aleatoriedad	152
Colectivos.....	152
Observación.....	152
5.3. Protocolo ODD: Detalles	153
Inicialización	153
Datos de Entrada	153
Submodelos	153
Interfaz Gráfica	156
5.4. Resultados de la Simulación Usando el Modelo Basado en Agentes.....	158
Escenario A: Cambio en el Agente Económico (Crear o agregar valor al producto) .	159
Escenario B: Cambio en el Agente Gestión y Administración (Fortalecer el asociativismo).....	162
Conclusión del Capítulo.....	167
CONCLUSIONES.....	168
BIBLIOGRAFÍA	172

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Sistema complejo como propiedad emergente de los principios de la teoría del caos, tomado de (Gómez, 2015)	22
Figura 2 Representación de un sistema no lineal (Zuñiga & Roa, 2018)	22
Figura 3 Elementos concebidos para configurar el sistema de producción de cacao	28
Figura 4 Localización del área de estudio	31
Figura 5 Arquitectura general de un sistema difuso tipo Mamdani, tomado de (Jorge Alejandro et al., 2013)	39
Figura 6 Estructura jerárquica para calcular el índice de complejidad del sistema de producción de Cacao	41
Figura 7 Estructura jerárquica para calcular el índice del subsistema Suelo-Cultivo a escala de finca para el cultivo de cacao	52
Figura 8 Estructura jerárquica para calcular el índice del subsistema socioeconómico a escala de finca	55
Figura 9 Estructura jerárquica para calcular el índice del subsistema Calidad de Cacao a escala de finca	60
Figura 10 Función de transformación de datos en bruto a grados de satisfacción para materia orgánica	62
Figura 11 Pertenencia de la variable de entrada OM con dos particiones difusas	64
Figura 12 Localización de las fincas estudiadas en Chaparral	68
Figura 13 Localización de las fincas estudiadas en Ortega	68
Figura 14 Localización de las fincas estudiadas en Mariquita	69
Figura 15 Estructura jerárquica del subsistema Productividad del suelo	70
Figura 16 Estructura Jerárquica para Calcular la Variable Química	71
Figura 17 Estructura Jerárquica para Calcular la Variable Física	74
Figura 18 Estructura Jerárquica Subsistema Cultivo	77
Figura 19 Estructura jerárquica del subsistema Social	82
Figura 20 Estructura jerárquica del subsistema Económico	86
Figura 21 Estructura jerárquica del subsistema Gestión y Administración	90
Figura 22 Estructura jerárquica del subsistema Calidad Sensorial del Licor de Cacao	96

Figura 23 Estructura jerárquica del subsistema Calidad Fisicoquímica del grano de Cacao	100
Figura 24 Estructura jerárquica del subsistema Prácticas de Beneficio	105
Figura 25 Distribución de la variable final y las variables agregadas intermedias del subsistema suelo-cultivo en las fincas de las tres zonas	118
Figura 26 Distribución de las variables agregadas en las fincas con valores atípicos.....	119
Figura 27 Marco conceptual del MBA para calcular Índice Socioeconómico.....	149
Figura 28 Interfaz gráfica del MBA Cacao- Tolima	157
Figura 29 Resultados MBA Cacao para C9 suponiendo un aumento en Servicios Básicos	158
Figura 30 Estructura de Plan Estratégico, de Agronegocio y Operativo para el fortalecimiento organizacional (Amézaga et al., 2013).....	165

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Asociaciones de productores de Cacao reportadas en Chaparral y Ortega	32
Tabla 2 Fuente de las variables de entrada del subsistema Suelo-Cultivo	53
Tabla 3 Origen de las variables de entrada del subsistema Socioeconómico.....	56
Tabla 4 Fuente de las variables de entrada del subsistema Calidad de Cacao	60
Tabla 5 Escala categórica para clasificación de resultados arrojados por GeoFIS	67
Tabla 6 Tipo, forma, parámetros y fuentes para diseñar las funciones de pertenencia de las variables de entrada de la variable agregada Química	72
Tabla 7 Conclusiones de regla para calcular la variable agregada Macronutrientes.....	73
Tabla 8 Conclusiones de regla para calcular la variable agregada Balance Nutricional.....	73
Tabla 9 Tipo, forma, parámetros y fuentes para diseñar las funciones de pertenencia de las variables de entrada de la variable agregada Física.....	75
Tabla 10 Generación de la variable Electrotérmica usando un operador FIS	75
Tabla 11 Generación de la variable Textura usando un operador FIS	76
Tabla 12 Generación de la variable Porosidad usando un operador FIS.....	76
Tabla 13 Asignación de pesos para generar la variable Analítica con un operador WAM..	76
Tabla 14 Generación de la variable Física usando un operador FIS	76
Tabla 15 Generación de la variable productividad usando un operador FIS.....	77
Tabla 16 Generación de la variable Fitosanidad usando un operador FIS	77
Tabla 17 Asignación de pesos para generar la variable Árbol con un operador WAM.....	78
Tabla 18 Generación de la variable Tecnología usando un operador FIS.....	78
Tabla 19 Generación de la variable Podas usando un operador FIS	78
Tabla 20 Generación de la variable Sistema usando un operador FIS	78
Tabla 21 Generación del Índice del subsistema Suelo-Cultivo usando un operador FIS	79
Tabla 22 Índice del subsistema Suelo-Cultivo con los datos de calibración (Chaparral)	79
Tabla 23 Resultados índice del Subsistema Suelo-Cultivo de las fincas de Mariquita.....	80
Tabla 24 Resultados índice del Subsistema Suelo-Cultivo de las fincas de Ortega.....	81
Tabla 25 Funciones de pertenencia de las variables de entrada de la variable Social.....	83
Tabla 26 Conclusiones de reglas para calcular la variable Servicios Básicos.....	84
Tabla 27 Conclusiones de reglas para calcular la variable Salud.....	85
Tabla 28 Funciones de pertenencia de las variables de entrada de la variable Económico ..	88

Tabla 29 Conclusiones de reglas para calcular la variable Transporte.....	89
Tabla 30 Conclusiones de reglas para calcular la variable Financiero.....	89
Tabla 31 Conclusiones de reglas para calcular la variable Empleo	89
Tabla 32 Funciones de pertenencia de las variables de entrada para calcular la variable Gestión y Administración.....	92
Tabla 33 Conclusiones de reglas para calcular la variable Perfil del Responsable.....	92
Tabla 34 Conclusiones de reglas para calcular la variable Gestión Ambiental.....	92
Tabla 35 Conclusiones de reglas para calcular la variable Relacionamento Institucional..	93
Tabla 36 Resultados índice del Subsistema Socioeconómico de las fincas de Chaparral....	93
Tabla 37 Resultados índice del Subsistema Socioeconómico de las fincas de Mariquita....	94
Tabla 38 Resultados índice del Subsistema Socioeconómico de las fincas de Ortega.....	95
Tabla 39 Forma y parámetros de las funciones de pertenencia de las variables de entrada para calcular la variable Calidad Sensorial del licor	97
Tabla 40 Conclusiones de reglas para calcular la variable Aromas específicos	98
Tabla 41 Conclusiones de reglas para calcular la variable Sabores Básicos.....	98
Tabla 42 Conclusiones de reglas para calcular la variable Defectos.....	98
Tabla 43 Conclusiones de reglas para calcular la variable Calidad Sensorial.....	99
Tabla 44 Forma y parámetros de las funciones de pertenencia de las variables de entrada para calcular la variable Calidad FísicoQuímica del grano	102
Tabla 45 Base de reglas para generar la variable Química.....	102
Tabla 46 Base de reglas para generar la variable Daño Interno	102
Tabla 47 Base de reglas para generar la variable Daño Externo	103
Tabla 48 Base de reglas para generar la variable Daño.....	103
Tabla 49 Base de reglas para generar la variable Tamaño	103
Tabla 50 Base de reglas para generar la variable Prueba de Corte.....	103
Tabla 51 Base de reglas para generar la variable Interior del Grano	103
Tabla 52 Base de reglas para generar la variable Física.....	103
Tabla 53 Base de reglas para generar el Índice de Calidad Fisicoquímica del grano	104
Tabla 54 Categorización de las variables de entrada para calcular Prácticas de Beneficio	106
Tabla 55 Forma y parámetros de las funciones de pertenencia de las variables de entrada para calcular la variable Prácticas de Beneficio	107

Tabla 56 Base de reglas para generar la variable Fermentación	107
Tabla 57 Base de reglas para generar la variable Secado.....	107
Tabla 58 Base de reglas para generar la variable Almacenamiento	108
Tabla 59 Base de reglas para generar la variable Pos cosecha.....	108
Tabla 60 Base de reglas para generar la variable Cosecha.....	108
Tabla 61 Base de reglas para generar el Índice de las Prácticas de Beneficio	108
Tabla 62 Base de reglas para calcular el Índice del subsistema Calidad del cacao.....	108
Tabla 63 Resultados del Subsistema Calidad de Cacao en las fincas de Chaparral	109
Tabla 64 Resultados del Subsistema Calidad de Cacao en las fincas de Mariquita.....	110
Tabla 65 Resultados del Subsistema Calidad de Cacao en las fincas de Ortega.....	111
Tabla 66 Índice de complejidad de los sistemas de producción de cacao en Chaparral	112
Tabla 67 Índice de complejidad de los sistemas de producción de cacao en Mariquita	113
Tabla 68 Índice de complejidad de los sistemas de producción de cacao de Ortega	114
Tabla 69 Resultados matemáticos de los subsistemas que integran la complejidad de los sistemas de producción de Cacao en el Tolima.....	116
Tabla 70 Resultados intermedios Subsistema Suelo-Cultivo de las fincas de Chaparral...	122
Tabla 71 Resultados intermedios Subsistema Suelo-Cultivo de las fincas de Mariquita...	123
Tabla 72 Resultados intermedios Subsistema Suelo-Cultivo de las fincas de Ortega	124
Tabla 73 Resultados intermedios del Subsistema Socioeconómico en Chaparral	127
Tabla 74 Resultados intermedios del Subsistema Socioeconómico en Mariquita	131
Tabla 75 Resultados intermedios del Subsistema Socioeconómico en Ortega	133
Tabla 76 Resultados intermedios del Subsistema Calidad de Cacao en Chaparral.....	136
Tabla 77 Resultados intermedios del Subsistema Calidad de Cacao en Mariquita.....	140
Tabla 78 Resultados intermedios del Subsistema Calidad de Cacao en Ortega.....	142
Tabla 79 Resultados promedio de las variables calculadas con GeoFIS.....	146
Tabla 80 Base de reglas para calcular la variable Rentabilidad del cultivo	154
Tabla 81 Base de reglas para calcular la variable Transporte	155
Tabla 82 Base de reglas para calcular la variable Comercial	155
Tabla 83 Valor del indicador socioeconómico usando MBA.....	159
Tabla 84 Resultados del Indicador Socioeconómico suponiendo cambios en las Variables Valor Agregado (Escenario A) o Relacionamento Institucional (Escenario B).....	165

RESUMEN

La incertidumbre, la complementariedad entre elementos y la no linealidad son características de los sistemas de producción de cacao y por tanto se definen como sistemas complejos. Esta investigación se propone modelar un índice de complejidad para los sistemas de producción de cacao utilizando herramientas de inteligencia artificial, específicamente lógica difusa y modelación basada en agentes, para las cuales es indispensable conocer cómo se configuran y cómo se comportan los sistemas de producción a fin de que la modelación y simulación retraten la realidad que en estos ocurre. En campo fueron georreferenciados los lotes del cultivo, se aplicaron encuestas y entrevistas estructuradas para recopilar información socioeconómica y de prácticas de beneficio, asimismo muestras de suelos y de grano seco fueron colectados para posteriormente enviarlos a análisis de laboratorio. Para el modelado de lógica difusa se empleó el software GeoFIS y para la modelación basada en agentes se usó Netlogo, ambas plataformas son de acceso libre. Los datos de 10 fincas se utilizaron para calibrar y ajustar el modelo que posteriormente fue validado con los datos de otras 20 fincas, todas ubicadas en tres municipios del Tolima en Colombia. Los resultados son fáciles de interpretar y consistentes con las observaciones de campo. Además, los resultados fueron validados con los productores de cacao que participaron en la investigación. Dado que las salidas intermedias de los modelos también son interpretables es posible identificar los factores que limitan la variable de salida final así como simular el comportamiento de los sistemas para evaluar estrategias de adaptación propuestas. Estos resultados pueden apoyar procesos de toma de decisiones para mejorar algunos componentes de los sistemas de producción a escala de finca, municipio o país.

Palabras Claves

Sistemas complejos adaptativos, Sistemas de inferencia difusa, Modelación basada en agentes

INTRODUCCIÓN

Históricamente el cacao ha estado presente en Colombia y en el departamento del Tolima, incluso cuando no se disponía de estudios de zonificación que validaran la aptitud de suelos para el cultivo y pese a las fluctuaciones de precio de insumos y del grano. Sin bien el índice de área cosechada y de producción en Colombia ha tenido una tendencia creciente desde 1961 y hasta 2016, el índice de rendimiento productivo (toneladas por hectárea) en el mismo período decreció (Abbott et al., 2018), eso significa que para producir una tonelada de cacao en 2016 se requería mayor superficie que en 1961. Conforme los datos de FAOSTAT en 2017-2019 dicha tendencia aparentaba haber cambiado, con rendimientos mayores que 0,85 t/ha, sin embargo las estadísticas de 2020 declinan dicho avance con un rendimiento promedio de 0,34 t/ha, similar al de los experimentados desde inicios de los años 60s.

Lo anterior es alarmante si se tiene en cuenta la inversión en tiempo y dinero de entidades de I+D+i nacionales e internacionales para modernizar los cultivos a través de la implementación de paquetes tecnológicos enfocados en aumentar la productividad.

Los programas de fomento del sector han transferido dichos paquetes tecnológicos como si fuesen recetas para seguir al pie de la letra, sin embargo, los productores han decidido, a partir de criterios materiales y no materiales, cuales cambios adoptar para adaptar el sistema de producción conforme sus condiciones socioeconómicas y agroambientales, así como la valoración de atributos asociados al cultivo, pues los productores como agentes activos son capaces de tomar decisiones que llevan a que el sistema se auto-organice y se generen cambios en las dinámicas que explican su permanencia en el tiempo y el espacio.

Asimismo, por la importancia del Cacao en términos de consumo internacional y la participación en la generación de ingresos para los productores a nivel mundial, yuxtapuesto a la alta variabilidad del precio internacional que afecta los ingresos monetarios de los productores, ha habido un marcado interés, principalmente en la última década, por parte de los economistas y decisores de política por comprender el funcionamiento del sector cacaotero sobre la base de la teoría de la ventaja competitiva y la cadena de valor (Abbott et al., 2018; APPCACAO, 2018; Arboleda & González, 2010;

Arevalo et al., 2016; Barreto, 2012; Botero, 2017; Campo & Herrera, 2012; Chávez-Malgiaritta, 2017; Clavijo & Ardila, 2015; Contreras, 2017; Espinal et al., 2005; García-cáceres et al., 2014; Guzmán et al., 2016; Perdomo, 2012; Swisscontact, 2016).

Estas investigaciones han ofrecido una aproximación a la comprensión del funcionamiento del sistema de producción, pero se han limitado a analizar flujos monetarios y de grano, y han buscado comprender todos los agentes que participan en los distintos eslabones de la cadena a través de técnicas lineales.

Además la investigación predominante en el sector cacaotero está centrada en el absolutismo tecnológico y/o mercantil, desconociendo que la producción de grano es el resultado de las interacciones entre los distintos elementos del sistema de producción, y por lo tanto se deben considerar la productividad, la conservación del medio físico y las condiciones de vida de los individuos inmersos en dichos procesos (R. García, 2011).

Desde un enfoque integrador de los aspectos productivos, socioeconómicos y ambientales se analizó la viabilidad de los Sistemas Agro-Forestales, incluyendo Cacao, en países como Costa Rica, Brasil, India, Guatemala, Haití y Colombia, demostrando que diversificar la oferta productiva contribuye a la seguridad alimentaria, a mitigar los riesgos económicos y a mejorar los medios de vida de los productores rurales, además de los beneficios ecológicos, todo eso se traduce en menor vulnerabilidad y mayor capacidad adaptativa al cambio climático de esos sistemas productivos (Montagnini et al., 2015).

Otras investigaciones que tienen como base el enfoque sistémico y el pensamiento complejo, se han enfocado en generar y estimar indicadores de sustentabilidad o sostenibilidad de la producción agropecuaria, dando origen a metodologías como el análisis emergético, metabolismo rural, MESMIS, o la aplicación de modelos econométricos tradicionales, los cuales se han usado para el caso del café en el suroccidente colombiano (Gonzalez, 2015) y para cacao en Huila-Colombia (Pettersson, 2016).

Sin embargo, dichos indicadores tienen en común la intención de modelar grupos de productores relativamente homogéneos, asimismo como predecir valores del beneficio monetario a través del uso de técnicas lineales, en lugar de simular patrones de comportamiento considerando la heterogeneidad de los individuos y valiéndose de técnicas no lineales, que es el fin último de las ciencias de la complejidad.

Toda vez que las formas de producción agrícola están definidas por las interacciones lineales y no lineales entre los elementos provistos por la naturaleza, el contexto individual y colectivo, los intereses de los tomadores de decisiones a distintas escalas y la estructura socio-económica e institucional, todos estos con una permanencia espacio-temporal y un objetivo concreto, los sistemas de producción de un bien agrícola se configuran como sistemas complejos y por lo tanto requieren ser abordados desde un paradigma que refleje las características reales del fenómeno analizado, capaz de conectar comportamientos micro con patrones de interacción de los agentes y pautas de comportamientos globales (R. García, 2011; Moriello, 2006; Olmedo et al., 2004; Perona, 2005).

Dado que un sistema complejo se caracteriza por ausencia de determinismo, descomponibilidad limitada, información y representación distribuida, emergencia y autoorganización, dinámicas irreversibles, súbitas, imprevisibles, aperiódicas, aprendizaje y adaptación (Maldonado, 2014; Olmedo et al., 2004; Perona, 2005) entonces para su análisis se requiere una lógica más inclusiva, capaz de valorar las diferencias, la diversidad de posiciones, las complementariedades, reciprocidades e interdependencia de todos los elementos que en él intervienen, así como sus relaciones dinámicas (en tiempo y espacio), complejas y unificadas (Boff, 1996).

Por tal razón esta propuesta se propone como objetivo general analizar la complejidad de los sistemas de producción de Cacao en el Tolima, a través de métodos de inteligencia artificial para proponer estrategias para mitigar el efecto de los factores que limitan la consolidación de esos sistemas de producción. Específicamente se empleará lógica difusa y modelación basada en agentes para integrar información de tipo cuantitativa y cualitativa, obtenida a partir de diferentes fuentes y medida en diferentes escalas de valor, para dar cuenta de la mayor cantidad posible de elementos del sistema de producción de cacao.

Los objetivos específicos planteados para este fin son: i) Realizar el diagnóstico de la complejidad de los sistemas de producción de Cacao en tres zonas del Tolima, a partir de la caracterización de los factores agroambientales, socioeconómicos y de calidad de Cacao, empleando lógica difusa. ii) Definir prioridades estratégicas en los tres casos de estudio a partir de los factores limitantes que influyen en la complejidad de los sistemas de producción de Cacao. iii) Proponer estrategias de adaptación para fortalecer la complejidad de los sistemas de producción de Cacao en los tres casos de estudio.

Este documento se ha diseñado para dar cuenta de cumplimiento de los objetivos propuestos a través de cinco capítulos. Capítulo 1. Presenta el marco teórico y conceptual sobre el cual se desarrolla esta investigación, abordando la complejidad como paradigma, metodología y ciencia, se exponen las características de los sistemas complejos adaptativos para finalmente concebir los sistemas de producción de cacao como sistemas complejos. Capítulo 2. Contiene la metodología y métodos empleados para llevar a cabo el desarrollo de cada una de las cinco fases de la investigación, que son: preparación y planificación, recolección de información, procesamiento de datos, retroalimentación y conclusión. Los Capítulos 3, 4 y 5 presentan los resultados de cada uno de los objetivos específicos, respectivamente.

En el Capítulo 3 está el diagnóstico de la complejidad de los sistemas de producción de cacao en tres zonas del Tolima, para eso primero se expone la concepción teórica de los subsistemas Suelo-Cultivo, Socioeconómico y Calidad de cacao, posteriormente se explica cómo se llevó a cabo la modelación de dichos sistemas usando GeoFIS, seguido de la explicación del comportamiento de cada subsistema (jerarquización de variables, funciones de pertenencia, operadores de agregación, base de reglas de decisión) y la interpretación de los resultados matemáticos para los subsistemas y del indicador final de complejidad de los sistemas de producción de cacao analizados.

El Capítulo 4 presenta los resultados de agregaciones anteriores al indicador final de complejidad porque a partir de estos se identifican los factores limitantes claves para definir prioridades estratégicas de cada uno de los sistemas de producción de cacao de las fincas analizadas. En el Capítulo 5 se configura, ejecuta e interpretan los resultados de un modelo basado en agentes para el subsistema socioeconómico de cada finca con el propósito de evaluar estrategias de adaptación para dinamizar la complejidad de los sistemas de producción de cacao en las tres zonas del Tolima.

Seguidamente se exponen las principales conclusiones generales que pretenden ser insumo para la formulación de política pública del sector cacaotero, además de brindar elementos con relación a la investigación interdisciplinaria para el sector agropecuario desde la visión de las ciencias de la complejidad.

Finalmente en el documento se puede hallar la bibliografía. Como anexo (digital) en un documento de texto se encuentran los formatos empleados para recolectar información

en campo, y en archivo CSV (comma-separated values) están los resultados completos del modelo en GeoFIS.

CAPÍTULO 1. CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD, SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS Y EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CACAO

El paradigma de la complejidad alude a que en el todo intervienen diversidad de elementos, energías y coyunturas temporales irreversibles que entran en sinergia y en sintonía para dar lugar a la formación espontánea de estructuras temporales, espaciales o funcionales a nivel macro (Boff, 1996; Helbing, 2012).

Por tanto, para comprender y explicar el funcionamiento de sistemas dinámicos, diversos y particulares, como es el caso de los sistemas agrícolas, que unifican la naturaleza, la economía y la sociedad, se debe recurrir a herramientas de inteligencia artificial como alternativa para simular los elementos componentes que actúan y retroactúan en el interior del sistema en un flujo dinámico que le hace funcionar como un todo organizado, transformándolo por los intercambios de materia, energía e información con el ambiente, como señala (Romero, 2003).

1.1. Ciencias de la Complejidad

Etimologicamente la palabra complejidad proviene del latín *complectere*, cuya raíz *plectere* significa trenzar, enlazar, el prefijo “Com” proporciona sentido de la dualidad de dos elementos opuestos que se enlazan íntimamente, pero sin anular su dualidad (Wilinski et al., 2013). En ese sentido tres líneas del pensamiento, distintas pero articuladas, han sentado sus bases sobre la lógica de la complejidad, estos son: el pensamiento sistémico, el pensamiento complejo y las ciencias de la complejidad.

A partir de (Elizalde, 2013; Maldonado, 1999; Maldonado & Gómez-Cruz, 2010)) es posible distinguir entre: 1. La visión del enfoque sistémico (Bertalanffy, Foester, Forrester, Capra, Maturana y Bateson) donde la complejidad equivale a una cosmovisión que le adscribe un papel determinante al observador; 2. El pensamiento complejo (Edgar Morin) que concibe la complejidad como método para aproximarse al mundo y al ser humano; y 3. La complejidad como ciencia (Institutos de investigación como el Santa Fe y La Jolla e institutos para la ciencia no-lineal como el de Santa Cruz, el del laboratorio nacional de los Álamos y el de la Universidad de California Davis, entre otros) que se ocupan de sistemas, fenómenos o comportamientos de complejidad creciente.

La teoría general de sistemas (TGS) presentada por Bertalanffy en 1973 propone una visión ampliada para el estudio de fenómenos complejos como un todo, es decir, sin fragmentar el objeto de estudio, como tradicionalmente venía haciendo la ciencia (Ossa, 2016). Entonces el enfoque sistémico busca dar más atención a las interrelaciones entre los elementos que determinan un fenómeno que al hecho en sí mismo, estas interacciones implican estructuras retroalimentadas con relaciones no lineales.

La TGS reconoce que existen sistemas abiertos y cerrados, mientras que en la complejidad es imposible que existan sistemas cerrados o asilados porque todos los sistemas necesitan información, materia y energía para funcionar, elementos estos que proceden del entorno (Maldonado & Gómez-Cruz, 2010).

El enfoque sistémico emplea el término complejo como adjetivo de los fenómenos y sistemas, sin embargo, desde las ciencias de la complejidad se acuña ese término sólo a aquellos que se comportan de manera compleja o se hacen complejos, es decir que no todo es complejo.

El pensamiento sistémico busca una comprensión holística de los fenómenos y en ese sentido pretende que todos los elementos componentes encajen perfectamente, sin embargo, como los sistemas complejos son dinámicos, lo que encaja en un tiempo X puede no hacerlo en un tiempo Y, a veces pueden haber elementos constituyentes ausentes (por ejemplo cuando falta información), o puede pasar que cuando un elemento encaja haya otro(s) que se desencajen en el mismo tiempo o en momentos subsiguientes. Entonces las ciencias de la complejidad no explican los fenómenos de manera holística sino como sistemas variables, plurales, y dinámicos (Maldonado & Gómez-Cruz, 2010).

En común el pensamiento sistémico y las ciencias de la complejidad tienen que no trabajan con base en el concepto de causalidad sino con el de emergencia para explicar aquellas relaciones donde no existe una conexión directa entre causa y efecto o cuando el efecto es imprevisible.

El pensamiento complejo reconoce que el término complejidad no debe ser confundido con complicación, si no que este último es apenas una parte de lo complejo en el sentido que se refiere a las inter-retroacciones entre los elementos que conforman la realidad, pero lo complejo está acompañado de incertidumbre, indeterminación, aleatoriedad y contradicción. Esto no significa que rechace la claridad, el orden o el determinismo, sino

que los concibe insuficientes, así como también lo es el holismo y su carácter totalizador/global, para comprender y explicar la realidad (Morin, 1994).

Por otro lado, la complejidad como método propone articular el pensamiento analítico-reduccionista y al pensamiento global, sustentando que las interacciones entre las partes del todo y del todo con las partes implican que las estructuras dinámicas de los sistemas no son deterministas, ni causales, ni lineales, ni predecibles, y por tanto para explicar sus funciones, procesos y comportamientos se requieren de visiones alternativas a la ciencia clásica.

Sin embargo, el pensamiento complejo carece de rigor conceptual, metodológico y matemático, utiliza “complejo” como adjetivo de positivo, deseable, favorable, lo que da cabida a ambigüedades. Además, se caracteriza por ser una visión netamente antropocéntrica, pretende cambiar la actitud del ser humano ante el mundo, la naturaleza y ante sí mismo, pero no pretende cambiar el mundo, y asume que por esa vía cambia la realidad, así el método se reduce a ideas, intuiciones, espíritu y propósito (Maldonado & Gómez-Cruz, 2010).

Conforme los mismos autores esas particularidades distinguen la corriente del pensamiento complejo de las ciencias de la complejidad, pues la episteme de estas últimas no se reduce ni a la ciencia ni a la filosofía, sino que consiste en una complementariedad entre las ciencias exactas y las ciencias sociales y humanas a fin de garantizar así su rigor conceptual y metodológico para aproximarse a los problemas reales de complejidad creciente.

De manera que las ciencias de la complejidad se encargan de estudiar los fenómenos, sistemas y comportamientos de complejidad creciente, caracterizados por rasgos como autoorganización, emergencia, no-linealidad, ausencia de control central rígido, paralelismo de fenómenos y procesos, pluralismo lógico, turbulencias, inestabilidades, incertidumbre, adaptación, aprendizaje, ausencia de sistemas jerárquicos, redes libres de escala, y otros. Existe un dialogo entre los fenómenos naturales, artificiales y humanos (Maldonado & Gómez-Cruz, 2010).

Entonces, el hecho que las ciencias de la complejidad se muevan entre la incertidumbre y la irregularidad hace que no prometan certezas, respuestas ni soluciones, su interés está en estudiar sistemas dinámicos de complejidad creciente (Elizalde, 2013).

Dentro de las ciencias de la complejidad una pequeña área que cobra cada vez mayor relevancia para abordar cuestiones asociadas a la producción, comercialización, distribución y consumo de bienes/servicios es la economía de la complejidad, término acuñado desde 1999 por Brian Arthur del Instituto Santa Fe, como alternativa para afrontar las limitaciones de la economía neoclásica al desarrollar modelos y análisis que reflejen las características reales de la sociedad. En este sentido las teorías de la complejidad han buscado proponer una nueva manera de conceptualizar los fenómenos económicos, y de construir modelos más flexibles que tomen en cuenta aspectos ignorados por la economía tradicional (Perona, 2005).

La excesiva complejidad de la realidad económica dificulta continuar sosteniendo la independencia entre el observador y la observación (principio de incertidumbre de Heisenberg, Teoría de los Colores de Johann Wolfgang von Goethe), además de considerar relaciones lineales entre causas y efectos. Ambos principios han incidido en cuestionar la certeza en la predicción que sostiene el enfoque neoclásico e impulsa a buscar otros modelos basados en la complejidad de la realidad en sí (Olmedo et al., 2004).

Entonces los procesos económicos básicos (producción, intercambio y consumo) son vistos como sistemas complejos dinámicos donde se crean estructuras en las que diversidad de agentes a nivel micro interactúan localmente (propiedades emergentes), dando lugar a patrones de comportamientos globales (nivel macro) tales como el empleo, las tasas de crecimiento, la distribución del ingreso, las instituciones de mercado o las convenciones sociales, debido a las interacciones (no lineales y distribuidas) entre los elementos del sistema (Olmedo et al., 2004; Sánchez, 2014).

A diferencia de la economía neoclásica la economía de la complejidad se caracteriza por (Miedes Ugarte, 2012; Perona, 2005; Sánchez, 2014; Schuschny, 2001):

- Hace énfasis en la individualidad, reconoce que los agentes son heterogéneos, se relacionan entre si y por eso no deben ser modelados colectivamente, alejándose del “agente representativo”.
- La racionalidad se entiende no como sinónimo de optimización sino cómo satisfacción del individuo de acuerdo al contexto. Apartándose de la visión del *Homo economicus*.

- Los sistemas son abiertos, dinámicos, no lineales y lejos del punto de equilibrio ya que su tendencia es a evolucionar en la dirección de una complejidad creciente. Abandonando la famosa cláusula “*ceteris paribus*” utilizada en el análisis de los modelos econométricos.

- Los patrones macro emergen de las interacciones y comportamientos de los niveles micro, hay una retroalimentación entre ambos niveles, entonces los resultados agregados no corresponden a valores puntuales sino a patrones de comportamiento, esto es, escenarios posibles.

- El proceso evolutivo de diferenciación, selección y amplificación provee al sistema de innovación y es responsable de su crecimiento en orden y complejidad.

- La tecnología es endógena al sistema.

En ese sentido, desde esta corriente se han formulado indicadores para medir la complejidad, como los propuestos por Hebert Simon, dentro de los que se encuentra el que mide complejidad a partir del nivel de interdependencia entre los componentes del sistema, y sugiere que a mayor interdependencia mayor complejidad (Perona, 2005).

Por otro lado, en la Universidad de Harvard bajo la autoría de Ricardo Hausmann y César Hidalgo, desde 2007, estiman el índice de complejidad económica a nivel de país, este cálculo mide la diversidad y sofisticación de las exportaciones de los países y asocia mayor complejidad con mayores tasas de crecimiento económico.

En Colombia los índices de complejidad económica y por producto son estimados por Bancoldex, estos indicadores valoran en términos económicos el conocimiento científico inmerso en la producción del bien (Bancoldex, 2014) y dejan de lado elementos de carácter social, cultural, agronómicos, biofísicos, climáticos y de calidad del bien producido. De manera que estos índices conciben las exportaciones agrícolas como de baja complejidad aludiendo a que requieren apenas conocimientos productivos “básicos”.

Sin embargo dichos índices desconocen la diversidad de elementos que intervienen, así como el alto grado de incertidumbre (de mercado, políticos, climáticos) al que están expuestos, los sistemas de producción agrícola y que difícilmente pueden ser controlados, a diferencia de los sistemas de producción industrial que si bien requieren conocimientos especializados los tomadores de decisiones tienen mayor capacidad para intervenir.

Por tal motivo se considera pertinente reformular el indicador de complejidad de los bienes agrícolas por uno que tenga en cuenta además de aspectos netamente económicos aquellos de carácter social, cultural, agronómicos, biofísicos, climáticos y de calidad del bien producido.

1.2. Sistemas Complejos Adaptativos

Un sistema se entiende como una abstracción simplificada de la realidad, compuesta por un conjunto de elementos que interaccionan dinámicamente entre sí y con el entorno, con una cierta permanencia espacio-temporal y con un objetivo concreto (Moriello, 2006).

Por tanto, el enfoque de sistemas dinámicos implica la interdependencia de los elementos que lo componen, así como su circularidad en diferentes niveles que le permite auto-organizarse, adaptarse y evolucionar continuamente para garantizar su existencia a largo plazo (Castillo-Villanueva & Velázquez-Torres, 2015).

El carácter complejo obedece a las interacciones entre sus muchos elementos componentes, propiedades emergentes que dificultan predecir lo que ocurrirá más allá de un horizonte temporal, pues una pequeña causa puede provocar un efecto enorme en el resultado y viceversa, por lo que su comportamiento es no lineal (Moriello, 2006).

Los sistemas de complejidad creciente son aquellos que aprenden, se adaptan, presentan dinámicas irreversibles, súbitas, imprevisibles, aperiódicas y lejos del equilibrio. La complejidad está donde las dinámicas y estructuras del sistema no pueden ser reducidas a explicaciones ni gestiones de tipo ciclico o previsible (Maldonado, 2014).

En ese sentido, un sistema complejo es una propiedad emergente de los tres principios de la teoría del caos, estos son: no-linealidad, incertidumbre y complementariedad (Gómez, 2015), como muestra Figura 1.

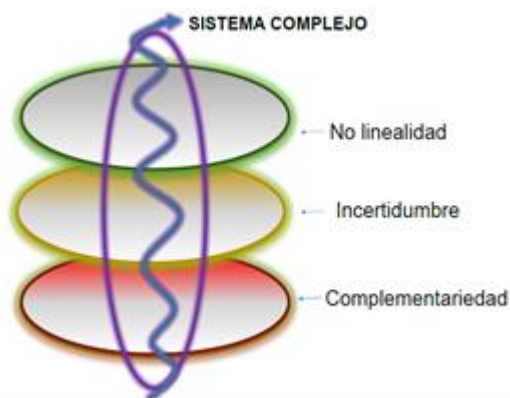


Figura 1 Sistema complejo como propiedad emergente de los principios de la teoría del caos, tomado de (Gómez, 2015)

- Principio de no linealidad: Los sistemas no lineales son difíciles de modelar porque su comportamiento en el tiempo es impredecible, como los sistemas con comportamiento caótico¹ (Zuñiga & Roa, 2018), por lo tanto la lógica cartesiana y la estadística clásica resultan insuficientes para representar la realidad de este tipo de sistemas.

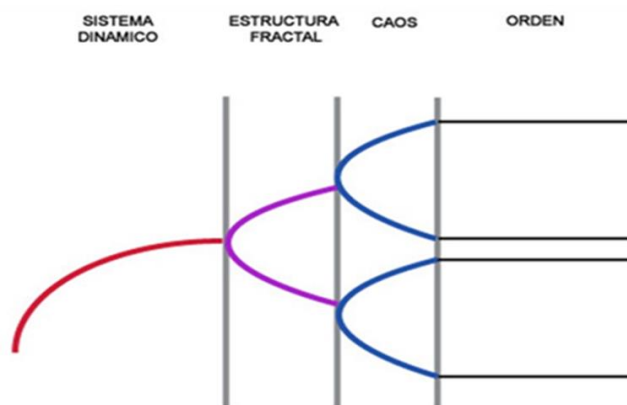


Figura 2 Representación de un sistema no lineal (Zuñiga & Roa, 2018)

En la Figura 2 se representa el comportamiento de un fenómeno real y complejo, en cuya fase inicial (color rojo) interviene solamente la materia, su crecimiento es lineal y por tanto reversible. Posteriormente el sistema entra en una fase fractal (color lila) en la que se

¹ Entiéndase caos no como desorden sino como el comportamiento de sistemas determinísticos caracterizados porque pequeñas variaciones en el estado inicial producen grandes diferencias en el resultado.

complementa la materia y la onda, entrando en fase irreversible, como los fenómenos caloríficos en un sistema dinámico abierto (Zuñiga & Roa, 2018).

Después entra en fase de caos (color azul) a lo largo de extensos períodos de tiempo en los que gira asintóticamente en las inmediaciones de ciertos valores- atractores- como si describieran órbitas a su alrededor, en esa repetición del proceso se generan infinidad de formas y pequeñas alteraciones en las condiciones iniciales o en los parámetros del proceso que pueden resultar en imprevisibles cambios finales. Finalmente, con la especialización y división de los elementos componentes, el sistema pasa de un estado más general y homogéneo a otro más especial y heterogéneo, se auto-organiza y por resiliencia, entra en un estado de orden (color gris) (Moriello, 2005).

- Principio de incertidumbre: La mayoría de los fenómenos reales y complejos no tienen un comportamiento exacto, sino imprevisible o aparentemente aleatorio, caracterizado por bifurcaciones y fluctuaciones en el tiempo y en el espacio.

- Principio de complementariedad: Se admite que la realidad compleja está formada por lo que es y lo que no es, por la parte y la contraparte, por la afirmación y la negación; la inclusión de lo diferente, de lo opuesto, de lo contradictorio, reconoce que las partes son complementarias e indivisibles, por eso aspira al conocimiento de lo diverso y lo particular, a diferencia de la lógica mecanicista, fragmentaria, dicotómica y reduccionista que aspira al conocimiento universal (Boff, 1996; Romero, 2003; Zuñiga & Roa, 2018).

En palabras de Lara-Rosano et al. (2017) un Sistema Complejo Adaptativo (SCA):

Consta de numerosos componentes diversos y autónomos (llamados agentes) que son interdependientes; están acoplados selectivamente por auto-organización a través de numerosas interconexiones; son homeostáticos; y se comportan como un todo unificado al aprender de la experiencia y se ajustan adaptándose a los cambios en el entorno; pueden aprender de la experiencia, construyendo atractores a partir de su memoria para facilitar sus respuestas ante el entorno (p.22).

Cada vez hay mayor consenso entre los desarrolladores de modelos sobre la necesidad de que sus simulaciones proporcionen una representación equilibrada de las dimensiones económica, ambiental y social de un sistema dado (Schreinemachers & Berger, 2011). Por lo tanto, el trabajo interdisciplinario es menester para el análisis de los SCA, al igual que el

uso de herramientas desarrolladas bajo el marco metodológico de las Ciencias de la Complejidad (Lara-Rosano et al., 2017).

1.3. Los Sistemas de Producción Agrícola como Sistemas Complejos

Los sistemas de producción agrícolas constituyen formas de organización social donde los individuos desarrollan técnicas y adoptan y adaptan tecnologías para aprovechar la base ecológica donde se localizan con el fin de producir algún(os) bien(es) y/o servicio(s), que pueden ser auto-consumidos y/o intercambiados.

Para alcanzar y/o conservar la viabilidad a largo plazo de las interrelaciones existentes con y entre la naturaleza, la sociedad y el mercado, los sistemas de producción evolucionan y se auto-organizan para adaptarse a las incertidumbres de mercado, de clima y de política.

Por lo tanto, la diversidad, interdependencia e interacción simultánea entre los elementos que configuran y explican el funcionamiento de los sistemas de producción agrícola llevan a concebirlos como SCA a partir de los que emergen estructuras agrarias.

Analizar la producción agrícola como un SCA exige una aproximación que refleje las características reales del fenómeno de estudio y conecte comportamientos micro con patrones de interacción de los agentes y pautas de comportamiento globales. Esto significa que se requieren herramientas que tengan en cuenta que:

- Muchos fenómenos son emergentes en función del contexto donde y cuando surgen, por lo tanto no hay ecuaciones preestablecidas que puedan explicarlos, adicionalmente, están constituidos por agentes heterogéneos y no por “agentes representativos” como supone la lógica clásica, y varios procesos sociales pueden ocurrir simultáneamente en el tiempo y en el espacio (Medina, 2011).

- La realidad no es lineal, es decir, no hay proporcionalidad entre las entradas y salidas del sistema. Mayores esfuerzos de los productores agrícolas (inversión de tiempo, dinero o suelo) no necesariamente se traducen en mayor calidad y cantidad de la producción, ni en mayores retornos financieros, ni en mejor calidad de vida, porque las relaciones entre los factores técnicos, administrativos, económicos, sociales, culturales, históricos y políticos, no son lineales y lo que es válido en un momento y espacio determinados, puede no serlo en otro.

Los sistemas agrícolas combinan los procesos biofísicos del entorno natural con la complejidad de la toma de decisiones humanas donde interactúan agentes heterogéneos, autónomos, capaces de adaptarse y evolucionar ante cambios en el entorno, y en conjunto producen patrones emergentes de la estructura agrícola, por lo tanto se constata que se trata de SCA (Bert et al., 2015).

Si bien los modelos de simulación son herramientas útiles y prácticas para representar la realidad, describir, explicar, predecir y/o evaluar cambios en los sistemas agrícolas, históricamente han predominado modelos matemáticos que emulan el problema como una cuestión meramente técnica, esto es, agronómica, ecológica o económica, o cuando se integran varios factores generalmente se emplean técnicas basadas en la lógica clásica que es reduccionista, mecanicista y lineal (Boff, 1996; R. García, 2011; Olmedo et al., 2004; Perona, 2005; Sánchez, 2014).

A eso se suma la falta de datos disponibles y las limitaciones para experimentar aspectos socioeconómicos de los sistemas de producción agrícola, haciendo que ciertas propiedades y comportamientos no puedan ser entendibles ni explicados a través de métodos tradicionales (Helbing, 2012). Entonces para abordar las problemáticas de los sistemas agrícolas es deseable y necesario articular métodos y metodologías de las ciencias sociales y de las naturales.

1.4. Sistema de Producción de Cacao como Sistema Complejo

El auge de Cacao en la esfera política nacional e internacional se reforzó desde la segunda década de los años 2000. A nivel nacional el interés se reflejó en el programa del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural-MADR- “Colombia Siembra”, que pretendía establecer 60.000 nuevas hectáreas (ha) entre 2015 y 2018; además entre 2020 y 2022 se pretendían renovar 70.000 ha de cacaotales envejecidos. A nivel internacional se concretó el programa de gobierno de los Estados Unidos (U.S.) “Cacao para la paz” para fortalecer la cadena de valor del Cacao en Colombia. Ambas estrategias pretendían fomentar las exportaciones colombianas sobre la base de aprovechar los altos precios (de 2013 a 2016), la potencial y creciente demanda mundial (principalmente de China) y la capacidad de Colombia para producir cacaos finos y de aroma según la Organización Internacional de

Cacao-ICCO- (International Cocoa Organization, 2015; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2016, 2021).

El objetivo de estos y otros programas ha sido promover un sector cacaotero más moderno, más productivo y más competitivo, lo que por un lado exige cambios en la configuración de los sistemas de producción tradicionales (sus bases ecológicas, las capacidades sociales y la identidad cultural) que han soportado la existencia del cultivo en el transcurso del tiempo, y por otro lado incentiva el surgimiento de nuevas formas de producción, a través de nuevos cultivos pertenecientes a nuevos productores que aunque no cuenten con experiencia en el cultivo están dispuestos a invertir recursos financieros a través de la adopción de cultivos más tecnificados y con vínculos socio-culturales basados en una economía de mercado.

En Colombia programas similares fueron implementados para cultivos como café sobre la base de la coyuntura del mercado externo favorable y el aprovechamiento de tecnologías desarrolladas para aumentar la productividad. Si bien en algunos casos específicos programas de fomento de este tipo han conseguido resultados exitosos, en general los productores nacionales están hoy más expuestos a fluctuaciones macroeconómicas como la devaluación de la moneda nacional, el incremento del precio de los insumos comerciales que eleva los costos de producción y la caída del precio de las *commodities*.

-Vulnerabilidad de los productores a choques macroeconómicos externos porque Colombia es tomador de precio, esto significa que la definición del precio nacional del grano está en función de la cotización de la bolsa de Nueva York o de Londres y el comportamiento del dólar, probablemente esto se explica porque la participación nacional en las ventas internacionales es del 1% (Federación Nacional de Cacaoteros, 2017).

-Alta variabilidad del precio nacional del grano: Dado que a los productores nacionales no se les garantiza un precio mínimo para el cacao, las fluctuaciones del precio internacional y el factor especulativo de los intermediarios, quienes concentran localmente la compra de cacao, la variación del precio nacional, promedio anual, puede superar el 25% hacia arriba, como en el período 2013-2015, o hacia abajo, como en los años 2011-2012 y 2016-2017 (Federación Nacional de Cacaoteros, n.d.). Estas fluctuaciones inciden en la asignación de tiempo y dinero que los productores hacen al sistema de producción.

-El mercado nacional se comporta como un oligopsonio, pues el 95% del Cacao que se produce en el territorio nacional proviene de pequeñas y medianas fincas, y el 90% de la producción es comprada por dos empresas, Casa Lúker y Nutresa (Abbott et al., 2018). Esto implica para los productores, por un lado, que siempre tienen un mercado para vender la cosecha, pero por otro lado, les inhibe su capacidad para fijar condiciones en el mercado, como negociar precios, lo que podría conducir a una pérdida de eficiencia.

-Incentivar la producción a largo plazo implica contar con mano de obra disponible cerca a los cultivos, cuando el tamaño del área y las restricciones familiares exijan contratar jornales. Esto es relevante para cacao porque es un cultivo intensivo en el uso de mano de obra, y es una de las razones por las que en Colombia y el Tolima predominan los cultivos con extensiones entre 2 y 2,5 ha, donde el 80% de los jornales permanentes corresponden a mano de obra familiar (García Lozano et al., 2006).

Además, no se puede perder de vista el bajo relevo generacional y la limitada disponibilidad de mano de obra del campo colombiano debido a la migración de la población rural a los centros urbanos como consecuencia del conflicto armado y la percepción de mejores oportunidades laborales y de formación en la ciudad. En el caso del Tolima a partir de los datos del Censo Nacional Agropecuario-CNA-2014 se estima que el 52% de los productores tienen una edad mayor que los 31 años, y aquellos entre los 19 y 30 años representan apenas el 14,3% del total.

-En 2006 se estimaba que 27.000 familias rurales vivían del Cacao (García Lozano et al., 2006) según los datos de (Abbott et al., 2018) una década después la cifra alcanzaba las 38.000 familias, esto podría indicar la inclusión de nuevos productores. De acuerdo con el CNA en el Tolima se reportaron 9.344 Unidades de Producción –UPA- con cultivo de cacao, esto equivale al 3,5% del total de UPAS del departamento (Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, 2016).

-Asimismo, se resalta la carencia de servicios de asistencia técnica para cacao. Solo 15% de todos los productores a nivel nacional reciben asistencia técnica, aunque en el Tolima esta cifra asciende al 24,8% (Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, 2016), aún continúa siendo preocupantemente baja, en especial para cultivos perennes, como el cacao que tiene un ciclo productivo de más de 20 años, y por tanto están expuestos a

fenómenos de variabilidad climática y el surgimiento de nuevas plagas y enfermedades, entre otros.

-Desarticulación entre lo que se investiga y lo que demanda la organización de cadena de cacao, pudiendo ser esta una de las causas de la baja y/o incompleta adopción tecnológica, conforme muestra el reporte de las entidades participantes del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología Agroindustrial -SNCTA- por áreas temáticas para el caso del cacao entre 2005 y 2015 (Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 2019).

Por lo tanto, los sistemas de producción de cacao están integrados por elementos de tipo agroambiental (recursos naturales en el sitio y material genético de siembra), actividades agronómicas (siembra, fertilización, podas, controles fitosanitarios), prácticas de beneficio (conjunto de actividades de cosecha y pos cosecha como son la recolección, desgrane, fermentación, secado, selección, clasificación, empaque, almacenamiento) y el entorno socioeconómico individual y colectivo, todos estos permeados por conocimientos, técnicas y tecnología.

Si bien la cantidad de elementos que conforman el sistema de producción de cacao pueden ser innumerables, para efectos de la presente investigación se tuvieron en cuenta los elementos que se presentan en la Figura 3.



Figura 3 Elementos concebidos para configurar el sistema de producción de cacao

Por ende, bajo el enfoque de las ciencias de la complejidad el sistema de producción de cacao puede ser entendido como un proceso socioeconómico/espacio/temporal que se expresa en un bucle: Naturaleza-Sociedad-Economía (y Calidad) alejado del equilibrio, por tanto, inestable y no sostenible, donde las perturbaciones y fluctuaciones pueden ser amplificadas generando irreversibilidad hacia formas de complejidad creciente.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y MÉTODOS

Si bien se espera que los avances conceptuales y metodológicos que de esta investigación se desprendan puedan ser adaptados y empleados en cualquier lugar del mundo y para otros sistemas de producción agrícola, aquí se tomó como referencia el cultivo de cacao debido al auge reciente de este producto a nivel nacional (por su promoción como alternativa para sustituir los cultivos ilícitos) e internacional (por la demanda creciente y el desarrollo de un nicho de mercado específico, catalogado como finos y de aroma que ha puesto la atención sobre los países de América Latina, entre ellos Colombia, por su potencial para hacer parte de este segmento de mercado).

En este capítulo se describen los instrumentos y procedimientos desarrollados en cada una de las fases en las que se llevó a cabo el proceso de investigación: 1) Preparación y planificación, 2) Recolección de información, 3) Procesamiento de datos, 4) Retroalimentación, y 5) Conclusión.

2.1. Fase 1: Preparación y Planificación

Primeramente se presentan los criterios y razones para la selección del área y de las fincas estudiadas, cantidad que estuvo sujeta a restricciones monetarias y de tiempo. Seguidamente se dan a conocer los instrumentos diseñados para la recolección de información en campo.

2.1.1. Área de Estudio

La selección específica de la zona de estudio, departamento del Tolima, obedece al hecho que este proyecto es financiado por la Gobernación del Tolima a través de un crédito-beca condonable en el marco de la convocatoria No. 755 de 2016.

A esto se suma que en la última década el Tolima ha representado el quinto mayor productor de Cacao en el país, después de Santander, Antioquia, Arauca, Norte de Santander y Nariño, concentrando en promedio, 7% de la producción nacional y con un rendimiento medio de 0,5 ton/ha, próximo del promedio nacional (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2018).

Dentro del mismo departamento es posible hallar áreas productoras de cacao donde las condiciones agroambientales, socioeconómicas y de tecnología son contrastantes, lo que es de interés fundamental para los fines de esta investigación.

La recolección de información se realizó en 30 fincas localizadas en los municipios de Chaparral (10), Mariquita (10) y Ortega (10) en el departamento del Tolima, Colombia.

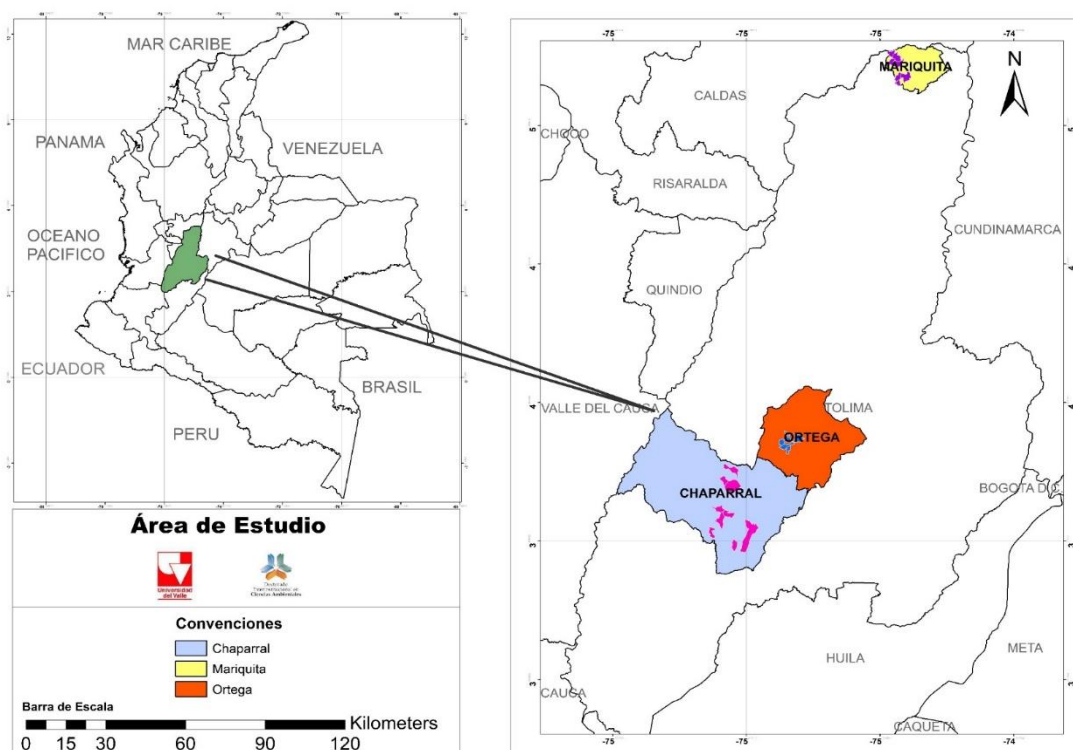


Figura 4 Localización del área de estudio

Chaparral es un municipio localizado al suroccidente del departamento, a $4^{\circ} 55'$ Latitud Norte y $75^{\circ} 07'$ de Longitud Oeste (Ver Figura 4), a una altitud media de 854 msnm, a 153 Km de distancia de Ibagué, la capital del departamento y con una temperatura media de 24°C . La extensión total del municipio es de 2.124 Km^2 y se caracteriza por ser predominantemente rural (99,7% del área), el 27,2% del suelo se usa para actividades agrícolas (Alcaldía de Chaparral-Tolima, 2018).

Ortega está localizado en el sur del departamento, como presenta la Figura 4, a $4^{\circ}07'$ Latitud Norte y $75^{\circ}26'$ de Longitud Oeste. Su extensión total es de 945,9 Km^2 de los cuales 75% corresponden a zona cálida (310-1.000 msnm), 19% a zona media (1.001-

1.999 msnm) y 5,6% zona fría (2.000-2.800 msnm); la temperatura promedio es de 26°C y la cabecera municipal está a 103 Km de distancia de Ibagué. Aunque el 99,5% del municipio es rural, la actividad agrícola emplea solo 13,8% del suelo (Alcaldía de Ortega-Tolima, 2017).

Si bien en Chaparral y Ortega históricamente ha existido la producción de cacao, el café ha sido el pilar de sus economías, sin embargo, con los cambios de temperatura ocurridos como consecuencia de la variabilidad y cambio climático, muchos productores se han visto forzados a sustituir este cultivo por otro, espacio que ha sido aprovechado para incrementar las áreas en Cacao.

A la Agrocadena de cacao en el sur del Tolima pertenecen 2.311 familias, 7.471 ha y una producción anual de 2.381 toneladas de grano. Se estima que en total cuentan con 1'449.297 árboles, de los que el 46,6% son considerados “envejecidos” y otro 15,5% “improductivos”; y veintisiete organizaciones de productores de grano, de las cuales doce se localizan en Chaparral y cinco en Ortega, las cuales se presentan en la Tabla 1 (Cadena productiva de cacao sur del Tolima, 2016).

Tabla 1 Asociaciones de productores de Cacao reportadas en Chaparral y Ortega

CHAPARRAL	
NOMBRE	REPRESENTANTE LEGAL
ECOAPROACIM	GERMAN PATIÑO
ASOPARAISO ALTAMIRA	DIOMEDES CASTAÑEDA
AMOCAL	ELSA PIRA PEREZ
APROCASURT	OLIMPO TAFUR MOSQUERA
ASOPROMUCO	HENRRY HERRERA
ASOCATOL	EFRAIN CARDENAS QUEZADA
ASOCIAMINEC	RICAURTE PRECIADO
ASOPROCAMAITO	FLORESMIRO VARON
AITDEM	JAIDIVER GUZMAN
ASAPROAGRO	EDWIN CRIOLLO
ASOPRACOP	JOSE HERLEYN SANCHEZ BOCANEGRA
ASOPROCAS	FERNEL SALAZAR
ORTEGA	
NOMBRE	REPRESENTANTE LEGAL
ASAGROL - LOANY TOY	JAIRO DUSSAN ROJAS
ASOPEROTOL	JAIRO VEGA
ASOACAS	OTILIA MORENO
ASOPROMECOL	ROBERTO LEAL OYOLA
AGROEMPORTEGA	AMANDA LUCIA CASTILLA

Fuente: adaptado de (Cadena productiva de cacao sur del Tolima, 2016)

De manera que, en el Tolima, Chaparral es el municipio con mayor número de asociaciones, cuenta con presencia de la única unidad técnica de FEDECACAO en el departamento y con la mayor área sembrada (casi 2.000 ha) pero con tasas de crecimiento negativas en área sembrada (-2,7%) y en producción (-5,1%), promedios anuales entre 2007 y 2016.

Caso contrario se da en Ortega, con menos del 20% del área sembrada y la mitad de asociaciones en comparación con Chaparral, en el mismo período presentó las mayores tasas de crecimiento en producción (49,9%) y área sembrada (61,7%) de la zona sur. Esto obedeció a la implementación de programas de fomento para incentivar el sector agrícola, así como a la transición de productores de Café a Cacao.

Chaparral y Ortega se encuentran catalogadas dentro de las zonas más afectadas por el conflicto armado -ZOMAC- (Ministerio de Hacienda y Crédito Público de Colombia, 2017), lo que ha influido en que estos municipios continúen siendo predominantemente rurales, con altas tasas de desplazamiento forzado e índices de pobreza multidimensional superiores al 70% (Gobernación del Tolima, 2015a, 2015c).

Como zona contraste del modelo de producción tradicional característico de la zona sur se consideró relevante considerar el municipio de San Sebastián de Mariquita, de ahora en adelante Mariquita. Éste fue sugerido por el jefe de la unidad técnica de FEDECACAO para el Tolima durante una entrevista semiestructurada aplicada el 02 de abril de 2018, la razón para incluirlo obedece a que este municipio cuenta con mayor: adopción de clones, áreas de cultivo y densidad de siembra.

Mariquita es un municipio localizado al norte del departamento, a 5°12' Latitud Norte y 74°54' Longitud Oeste (Ver Figura 4), 495 msnm de altura, a 116 Km de Ibagué y una temperatura promedio de 26°C. Cuenta con una extensión de 288 Km², de la cual el 99,3% es rural, y con un índice de pobreza multidimensional del 49% (Gobernación del Tolima, 2015b).

Del área total del municipio solo 16,2% es usada en actividades agrícolas. Dentro de los cultivos que históricamente se han destacado están la Caña panelera, el Aguacate y el Mangostino (Gobernación del Tolima, 2015b). El Cacao por su parte es un cultivo

relativamente reciente en la zona, llegando a ocupar 520 ha del municipio en 2016 y con una producción que creció a una tasa promedio anual de 35,9%.

De manera que el área de estudio está integrado por tres municipios donde el cultivo de Cacao atraviesa por fases de desarrollo heterogéneas, en el caso de Chaparral se encuentran sistemas de producción tradicionales; en Ortega, se pueden encontrar sistemas de producción tradicionales con cultivos relativamente nuevos, producto de la transición desde otras actividades como el café y la explotación minera; finalmente en Mariquita es posible hallar cultivos nuevos bajo sistemas de producción tecnificados.

2.1.2. Selección de Fincas

Una vez definidos los municipios se convocó a los representantes legales de todas sus asociaciones de productores de cacao para seleccionar las fincas para trabajar. Se llevó a cabo una reunión con ellos en el casco urbano de cada municipio para socializarles el proyecto y que posteriormente sugirieran los participantes potenciales teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Fincas con cultivo de cacao con más de 3 años en fase productiva
- 500 o más árboles, el equivalente a 0,5 ha
- Productores con clones y/o con híbridos
- Incluir en lo posible productores que estuvieran llevando a cabo algún proceso de generación de valor agregado.

Respetando el carácter de heterogeneidad entre sistemas de producción, y la participación proporcional de las asociaciones reportadas por Fedecacao y/o UMATTA, se identificaron los 10 productores en cada zona, se estableció contacto telefónico con ellos para explicarles en qué consistía el proyecto y una vez aclaradas sus inquietudes estos decidieron participar o no del mismo.

2.1.3. Instrumentos para Capturar Información

Durante la recolección de información se buscó captar información cuantitativa y cualitativa de los sistemas de producción a nivel de finca, a continuación se presenta cada uno de los instrumentos empleados y se explica su fin en cada caso.

1. Cuestionario como forma de entrevista dirigida (López-Roldán & Fachelli, 2015): Se elaboró un cuestionario constituido por: a) Información sociodemográfica general del encuestado, de la finca y del cultivo, b) 14 preguntas sobre condiciones agro-ambientales del sistema de producción (aspectos biofísicos del terreno y el cultivo) para ser respondidas por el Ing. Agrónomo en una escala porcentual, y c) 48 preguntas abiertas y con respuesta de escala tipo Likert (Obando, 2015) para ser contestadas por el productor agrícola según su percepción sobre aspectos de manejo del cultivo, condiciones financieras, sociales a nivel colectivo, familiar e individual y aspectos culturales inherentes al sistema de producción de Cacao (Ver Anexo 1).

2. Registro agronómico de campo: Se definió el protocolo para la toma de muestras, adicionalmente, en cada punto de muestreo el Ing. Agrónomo evaluó las condiciones nutricionales, productivas y fitosanitarias del cultivo tomando como referencia el árbol más próximo de donde se tomaron las muestras de suelos y los 20 árboles alrededor, además se indagó al productor sobre prácticas de cosecha y pos cosecha (Ver Anexo 2).

3. Formato de Georreferenciación: Como linderos del lote de cacao y puntos de muestreo fueron georeferenciados con GPS, se reportaron los números ID de cada punto, además de la numeración de los cilindros con que se tomó cada una de las repeticiones de la muestra no alterada de suelo, esto con el fin de tener una trazabilidad de la información. Adicionalmente se tomó en cada punto la resistividad eléctrica, la humedad volumétrica, la floración, el área foliar, las mazorcas cuajadas y la altura del árbol (Ver Anexo 3).

4. Encuesta Socioeconómica: Se construyó un cuestionario de preguntas con respuestas cerradas para ser aplicado, en un segundo momento, a los productores con el propósito de complementar con información cuantitativa la información recogida durante la entrevista dirigida (Ver Anexo 4).

2.2. Fase 2: Recolección de Información

Entre diciembre de 2018 y Enero de 2019 un equipo conformado por un Ing. Agrónomo, una Ing. Agroindustrial, una Economista y un Asistente de investigación visitó cada una de las 30 fincas con el fin de recolectar las muestras de suelos y cultivo, y aplicar la entrevista

dirigida, el registro agronómico y la georeferenciación. La encuesta socioeconómica se aplicó en noviembre de 2019.

2.2.1. Información del Subsistema Suelo-cultivo

Se muestrearon los suelos a una profundidad de 0-15 cm, en 3 puntos diferentes del lote de cacao. En cada punto, con un Barreno de núcleo, se tomaron 3 muestras de suelo no alterada. Además, con el uso de herramientas agrícolas (Palín, Pala y Balde), se recolectó 1kg de suelo en cada punto para tomar la muestra alterada.

Todas las muestras fueron rotuladas y almacenadas en bolsas plásticas con cierre hermético para ser transportadas al laboratorio, donde las muestras no alteradas fueron empleadas para el análisis de las propiedades físicas de suelos y las muestras alteradas fueron enviadas al laboratorio encargado examinar las propiedades químicas del suelo.

En cada punto de muestreo el Ing. Agrónomo evaluó las condiciones nutricionales, productivas y fitosanitarias del cultivo tomando como referencia el árbol más próximo de donde se tomaron las muestras de suelos y los 20 árboles alrededor.

Los linderos de cada lote y cada uno de los puntos de muestreo fueron georreferenciados empleando un GPS Garmin Etrex 20x. Posteriormente, empleando ArcMap 10.3.1 se realizaron los mapas de cada finca.

2.2.2. Información del Subsistema Socioeconómico

Primero se aplicó la encuesta tipo entrevista dirigida para conocer la percepción y valoración de los productores respecto a sus condiciones socioeconómicas, posteriormente esta información se complementó con la encuesta cuantitativa.

2.2.3. Información del Subsistema Calidad de cacao

Una muestra de 2Kg de grano de cacao fermentado y seco fue recogida en 19 de las fincas durante el período de levantamiento de información en campo, en las 11 fincas restantes, los productores se hicieron responsables de enviar vía correo físico al laboratorio ILAMA de la Universidad del Valle la muestra de 2Kg de grano seco.

La muestra de cada finca fue debidamente rotulada y almacenada en bolsa de papel y posteriormente en bolsa plástica tipo hermética para evitar humedad.

La utilización de la muestra fue:

- 300g se enviaron al laboratorio Agrilab para calcular el contenido de Cadmio (Cd).
- Entre 400-500g se enviaron al laboratorio de alimentos de la Universidad de Antioquia para la transformación del grano a licor de cacao mediante un proceso de tostión, descascarillado y molienda. Posteriormente, con el licor obtenido se llevó a cabo la evaluación sensorial mediante prueba descriptiva cuantitativa por aproximación multidimensional, conforme la Norma Técnica Colombiana (NTC) 3932.

Con la evaluación sensorial se identificaron y seleccionaron el conjunto de descriptores relevantes, que dan la máxima información sobre los atributos sensoriales del producto objeto de estudio, con el propósito de establecer un perfil sensorial, valorando las intensidades de los descriptores con jueces entrenados en escala de calificación de 0 a 10 y utilizando como referencia las NTCs 3501, 3932 y las Guías Técnicas Colombianas (GTC) 165 y 226.

- Para evaluar la calidad física de las muestras, conforme los criterios y parámetros establecidos en la NTC 1252 (ICONTEC, 2003) se emplearon 450g, con los mismos se llevó a cabo la prueba de corte que consiste en tomar aleatoriamente 100 granos de la muestra, cortarlos longitudinalmente con la finalidad de clasificarlos de acuerdo con la coloración interna del grano y la profundidad de las estrías que se forman en su interior.

Los granos fueron clasificados en granos sin fermentar (pizarrosos), insuficientemente fermentados y con fermentación adecuada, los granos con buena fermentación se caracterizan por tener color marrón o marrón rojizo y estrías profundas, mientras que los granos pizarrosos se caracterizan por la ausencia de estrías y coloración violeta, gris negruzco o verdoso (Rivera et al., 2012).

Se hizo conteo de la cantidad de granos vacíos (pasilla), granos pegados o múltiples, granos con moho, rastros de infestación por insectos, germinados e impurezas, se pesaron y se calculó el porcentaje que representaban dentro del peso total de la muestra.

Para calcular el índice de grano se pesaron 100 granos aleatoriamente, posteriormente para calcular la heterogeneidad se seleccionaron los 8 granos más grandes y los 8 más pequeños (que no estuvieran vacíos) de esa sub muestra, se calculó el promedio y la

desviación entre los pesos de esos 16 granos, se dividió la desviación entre el promedio de los pesos medios de: los 100 granos, los 8 granos grandes y los 8 granos pequeños.

- Con 3 granos tomados aleatoriamente de cada una de las muestras se cuantificó la acidez volátil (pH), con potenciómetro, en el laboratorio de alimentos de la Universidad del Valle.

2.3. Fase 3: Procesamiento de Datos

Todos los datos fueron tabulados en hojas de cálculo de Excel y organizados de acuerdo con lo requerido para su procesamiento según el método empleado. Los datos de las fincas de Chaparral fueron usados para calibrar los modelos diseñados, mientras que los de las fincas de Ortega y Mariquita sirvieron para validarlos.

Por su capacidad para analizar y modelar sistemas complejos adaptativos reales, la aplicación de técnicas de no lineales, gestadas en las ciencias de la computación en los años 50, han cobrado auge a escala comercial y académica principalmente desde los años 90. En el sector agropecuario algunas de las técnicas de inteligencia artificial ampliamente usadas son: Redes Neuronales, Sistemas Expertos, Lógica Difusa, Aprendizaje Automático, Ingeniería del conocimiento, Sistemas multi-agente o Inteligencia Artificial Distribuida, Razonamiento basado en casos, Redes Bayesianas, Vida artificial, Computación evolutiva y Minería de datos (Bustos M., 2005).

En esta investigación serán empleadas lógica difusa, específicamente sistemas de inferencia difusa, y modelación basada en agentes. A continuación se presentan brevemente en que consiste cada una.

2.3.1. Lógica Difusa

Para analizar el comportamiento complejo de los sistemas agrícolas muchas técnicas basadas en inteligencia artificial pueden y han sido usadas. Entre estas, lógica difusa es particularmente interesante porque funciona como una poderosa interfaz entre el razonamiento humano y el mundo digital, ya que usa lenguaje natural para diseñar modelos computacionales en los que el conocimiento experto puede ser incluido.

Además lógica difusa permite la gestión de información heterogénea, esto es, datos cualitativos y subjetivos, los cuales son caracterizados por incertidumbre e imprecisión, es decir que la vaguedad del razonamiento humano puede ser incluida dentro de la modelación.

Los Sistemas de Inferencia Difusa-FIS- por sus siglas en inglés, pueden basarse en conocimiento experto (Guillaume & Charnomordic, 2012) y pueden ser usados para soportar los procesos de toma de decisiones integrando información aproximada y modelando la incertidumbre para inferir un resultado (salida) a partir de fuentes de información (entradas) de varios tipos (Coulon-Leroy et al., 2013).

A diferencia de la estadística, que construye el razonamiento en términos de posibilidades de pertenecer o no a un conjunto dado, como si la realidad fuese dicotómica, la lógica difusa trabaja con grados de pertenencia respecto a algún conjunto para acercarse al razonamiento humano y a la realidad. La necesidad de trabajar con conjuntos difusos² obedece a que hay conceptos que no tienen límites claramente definidos, entonces, a partir de la inferencia difusa se genera un mapeo para asignar a una entrada una salida, mediante el uso de funciones de pertenencia y reglas generadas sobre la base del conocimiento.

El sistema difuso más común y que emplea en esta investigación es el de tipo Mamdani, cuya arquitectura general obedece al esquema de la Figura 5.



Figura 5 Arquitectura general de un sistema difuso tipo Mamdani, tomado de (Jorge Alejandro et al., 2013)

El proceso inicia con la entrada de datos reales al sistema (X en U_1) al bloque Fuzzificador (difusor), allí se procesan y convierten en valores difusos calculando el grado

² Conjunto difuso se refiere a un valor lingüístico (diferentes clasificaciones de las variables lingüísticas) junto a una función de pertenencia.

de pertenencia de cada valor con cada conjunto difuso para que puedan ser procesados por el mecanismo de inferencia. Las funciones más usadas por su simplicidad matemática son la L y la GAMMA para calificar valores lingüísticos³ extremos, y la PI (trapezoidal) y la LAMBDA (triangular) para valores intermedios.

Una vez se tienen los niveles de pertenencia arrojados por el Fuzzificador se definen las reglas, tipo Sí (antecedente) - Entonces (consecuente), que describen la evolución lógica del sistema y realizan inferencias a partir de hechos y relaciones difusas entre las entradas y la salida. Como la salida arrojada por el mecanismo de inferencia es un valor difuso, que no puede ser interpretado por un elemento externo que solo trabaje con información numérica, en el Defuzzificador (desdifusor) se procesa y convierte la salida en un valor numérico.

Algunas investigaciones, tales como (Amini et al., 2020; Ferraro, 2009; Peche & Rodríguez, 2012; Torbert et al., 2009) emplearon lógica difusa para calcular índices: de sostenibilidad de producción de arroz, condiciones ambientales del suelo en cultivos transitorios, calidad físico-química del suelo desde una perspectiva ambiental y de la calidad del suelo, respectivamente. Todos ellos además aplicaron técnicas multicriterio, principalmente Procesos jerárquico analítico-AHP- por sus siglas en inglés, para definir a partir de un panel de expertos los atributos incluidos en el índice, la importancia relativa de cada uno, las funciones de membresía o las conclusiones de regla. Si bien las salidas emitidas fueron de magnitud adimensional, permitieron analizar comparaciones entre superficies de producción.

Varios softwares han sido desarrollados para facilitar el diseño de FIS. Aquí se empleará GeoFis (*Data Fusion - GeoFIS*, n.d.) porque es un software abierto, gratuito y capaz de integrar indicadores con efecto conocido y medible (Leroux et al., 2018).

El índice propuesto se basa en mediciones que rara vez se utilizan, dado que a menudo no están fácilmente disponibles, luego pretende ser una herramienta útil para determinar las fortalezas y debilidades de las relaciones entre los elementos involucrados en los sistemas de producción de cacao y así soportar la toma de decisiones en estos.

La implementación del modelo resultante puede ser adaptada a los datos para otras regiones productoras de cacao del mundo o para otros cultivos con el propósito de

³ El término "lingüístico" hace referencia al calificativo, mediante el lenguaje hablado, de los conceptos en análisis.

identificar las mejores prácticas de gestión agrícola y soportar la toma de decisiones técnicas que generen complejidad creciente, y por ende perpetuidad en el tiempo, en los sistemas de producción.

En la Figura 6 se presenta la estructura jerárquica tipo cascada diseñada para analizar y calcular el indicador de complejidad propuesto para los sistemas de producción de Cacao en Tolima como una relación difusa entre los subsistemas suelo-cultivo, socio-económico y calidad de cacao.

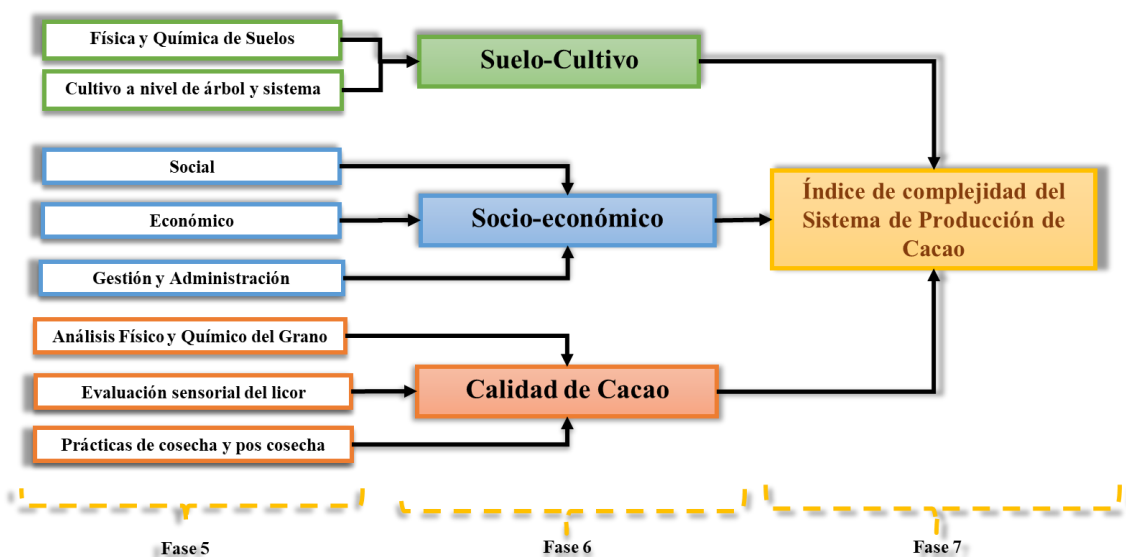


Figura 6 Estructura jerárquica para calcular el índice de complejidad del sistema de producción de Cacao

Debido a que valiosa información sobre condiciones socioeconómicas y culturales de los productores corresponden a valoraciones (en escala porcentual) realizadas por cada uno de los productores a partir de su percepción, se considera que lógica difusa puede no ser una herramienta suficiente para integrar este tipo de información al análisis, por lo que se usará de la modelación basada en agentes para complementar el análisis propuesto.

La razón por la que se considera que lógica difusa puede ser limitada para analizar la información socioeconómica obedece a la dificultad para definir las funciones de pertenencia para dichas condiciones, y como se ajustan a estas las valoraciones de los productores, porque cómo afirma Vargas (1994) la percepción es:

El proceso cognitivo de la conciencia que consiste en el reconocimiento, interpretación y significación para la elaboración de juicios en torno a las sensaciones obtenidas del ambiente físico y social, en el que intervienen otros procesos psíquicos entre los que se encuentran el aprendizaje, la memoria y la simbolización (p.48).

Esto significa que la percepción es construida a partir de la experiencia de vida de cada sujeto y como cada uno concibe la realidad, de manera que aunque dos individuos valoren con la misma magnitud una condición está puede en realidad ser de manera diferente.

Por tal motivo para complementar el análisis del subsistema socioeconómico se recurrirá a una técnica que no requiera la definición de funciones de pertenencia sino que produce resultados como patrones que emergen de la interacción entre los agentes que conforman el sistema, esta es, la modelación basada en agentes.

2.3.2. Modelación Basada en Agentes (MBA)

La MBA se destaca por su capacidad para capturar fenómenos emergentes, su flexibilidad, el uso de lenguaje natural para describir la dinámica de un sistema, modelar el vínculo de lo micro (local) a lo macro (estructuras o patrones sociales), simular la temporalidad y el espacio así como la heterogeneidad de los agentes (comportamientos, identidades, preferencias, creencias, etc.), permitir la construcción de modelos de racionalidad limitada donde los agentes tienen capacidades cognitivas restringidas e información limitada y son capaces de modificar su conducta basados en sus experiencias, y porque permiten realizar experimentos virtuales con sistemas artificiales (Bonabeau, 2002; Rodríguez Zoya & Roggero, 2015).

Dentro de los estudios donde se ha aplicado MBA para abordar sistemas agrícolas se resaltan las iniciativas de Berger (2001) que se propone ser un marco de evaluación de los procesos de innovación y el cambio en el uso de recursos para lo cual recurre al uso de autómatas celulares y MBA para integrar submodelos económicos e hidrológicos en un marco espacial junto con la toma de decisiones a escala de hogar agrícola en una región de

Chile. Y la del MBA Agripolis que se enfoca en simular simultáneamente y estudiar las interrelaciones entre una gran cantidad de granjas que actúan individualmente, mercados de productos, actividades de inversión, así como el mercado de tierras y una representación espacial simple (Happe et al., 2004).

En general, los principales fenómenos agrícolas que se han estudiado empleando MBA, conforme Pavón, López, & Galán (2012) y Sylvestre, Lopez-Ridaura, Barbier, & Wery (2013) están la gestión de recursos naturales, como agua y suelo; y la evaluación de políticas agrícolas (Kremmydas et al., 2018).

a) Cambios en el uso de la tierra: A partir de (Greiner, 2014) esta categoría conceptual se refiere al estudio de la interacción entre los ecosistemas y el ser humano y como esta relación afecta patrones de clima global que generan cambios en factores económicos y demográficos que influyen en el comportamiento humano y la transformación del entorno natural a un entorno construido, pudiendo obedecer a objetivos de producción agrícola o no, y en zonas urbanas o rurales.

La aplicación de esta aproximación teórica está vinculada principalmente a buscar las alternativas de cultivos más productivos, así como la distribución de estos, según las características, las condiciones de fertilidad y la conservación del suelo que se consideren los efectos del clima y su rivalidad con usos agrícolas (urbanización), todo esto con el fin de apoyar procesos de toma de decisiones sobre planificación agrícola sustentable.

En esta área se encuentran el simulador de la dinámica del uso de la tierra –LUDAS- (Le et al., 2008, 2010), el modelo interactivo basado agentes para transición del uso de la tierra- ILUTABM- (Tsai et al., 2015), el modelo Pampa (Bert et al., 2011) y su extensión sobre el mercado de alquiler de tierras- LARMA- (Bert et al., 2015), la herramienta dinámica de cambio de uso del suelo CHANOS (Mialhe et al., 2012), entre otros.

b) Gestión del agua: asociado a sistemas de riego en cultivos, esto basado en el uso intensivo de agua para la producción agrícola y ante la escasez de este recurso natural en tiempos de sequía, de manera que se garantice además de la sostenibilidad ecológica la seguridad alimentaria de los agricultores. De esta manera se apoya la toma de decisiones informadas asociadas a los conflictos y las prácticas en el uso de los recursos hídricos.

Con relación a asuntos de cambios en el uso de la tierra y la gestión del agua se identificó que la mayoría de estas investigaciones están permeadas por la generación y evaluación de estrategias de adaptación al cambio climático.

Entre los modelos desarrollados para este fin se encuentra la simulación multi-agente de procesos altamente entrelazados- MAELIA- (Lardy et al., 2014; Therond et al., 2014), el laboratorio virtual para explorar el impacto del cambio climático- SimKat- (Asseng et al., 2010) y el modelo interactivo FlowLogo (Castilla-Rho et al., 2015).

c) Evaluación de políticas: como área de trabajo en crecimiento, principalmente en lo que se refiere a la evaluación de impacto ex ante y ex post sobre el sistema donde se implementa la política y en sus actores.

Entre los modelos desarrollados para este fin están el marco Evaluación Integrada Participativa del Sistema Agrícola- PIAAS- (Sylvestre et al., 2013), el modelo de emisión de nutrientes basado en agentes en ganadería -ANEM- (Zheng et al., 2015), el Simulador regional de múltiples agentes- RegMAS- (Lobianco & Esposti, 2010), el modelo de análisis de ciclo de vida basado en agentes para la adopción potencial de switchgrass como biomasa por parte de los agricultores- AB-LCA- (Bichraoui-Draper et al., 2015). Una revisión más profunda específicamente en este área se encuentra en (Kremmydas et al., 2018).

Otros modelos han sido empleados para abordar fenómenos específicos en áreas como la ecología, aquí se hallan el sistema espacializado multiagente para colonización de paisaje por Ash- SMASH- (Gibon et al., 2010), el simulador de *Brown Plant Hoppers*- BPHSim (Phan et al., 2010), el sistema de simulación de animales, paisajes y hombres- ALMaSS- (Topping, 2011) y el modelo espacialmente explícito basado en el individuo para la población de lobos-IBSE- (Stenglein et al., 2015).

Entre las plataformas de MBA más empleadas para el análisis de sistemas agrícolas están Repast (North et al., 2006), Netlogo (Wilensky & Rand, 2015), CORMAS (Bommel et al., 2016) y GAMA (Amouroux et al., 2009; Taillandier et al., 2012), probablemente esto se deba a que son herramientas gratuitas y que disponen de ambientes creados previamente que pueden ser adaptados según el interés del usuario, con excepción de CORMAS, se trata de softwares de código abierto.

En este tipo de modelación se conciben los agricultores como agentes activos capaces de tomar autónomamente decisiones para satisfacer la multifuncionalidad de su sistema

productivo, esto es, sobre prácticas de manejo que inducen a cambios en el ambiente natural y cómo afrontar los cambios que ocurren fuera de su control (incertidumbre del mercado, cambio climático y nuevas políticas).

Dos grandes tipos de modelajes se identifican de acuerdo con su orientación, uno de investigación, enfocado en analizar los procesos propios que ocurren en los sistemas, y otro de políticas, orientados a cuestiones prácticas de políticas de extensión o regulación y como esta afectan las relaciones funcionales de los sistemas agrícolas.

Por lo tanto, la abundancia de trabajos que es posible hallar en la literatura reciente para representar la diversidad de elementos y situaciones presentes en la producción agrícola en función de la relación entre el cultivo, los ecosistemas, los aspectos socio-culturales y los económicos, a través de MBA, constata su carácter interdisciplinario para analizar los sistemas agrícolas como SCA.

En ese sentido MBA puede ser vista como una herramienta útil para abordar la complejidad inherente a los sistemas de producción agrícola, es decir, para representar la realidad particular, simular cuantitativamente, comprender de una manera más natural y a diferentes escalas, y dar soporte a los procesos de toma de decisiones, tal y como sugieren Bert et al. (2015) y Happe et al. (2004).

2.4. Fase 4: Retroalimentación

Los resultados preliminares fueron socializados con los productores a través de talleres. Se llevaron a cabo reuniones con cinco productores cada día en cada municipio, hasta atenderlos a todos. Se les entregó una carpeta que contenía el mapa de su lote de cacao con la localización de los puntos de muestreo, los resultados en bruto de los análisis físico, químico y cadmio del suelo, así como las evaluaciones sensoriales del licor de cacao y de la calidad física del grano.

Con el fin de realizar la validación de resultados por parte de los productores, durante la reunión, se les explicó la construcción de los indicadores, los rangos óptimos para interpretar los resultados intermedios e indicadores finales, y finalmente se les preguntó si los mismos correspondían con la realidad de sus fincas. Asimismo se indagó por posibles causas que pudiesen explicar los resultados obtenidos.

2.5. Fase 5: Conclusión

Se entregaron los resultados de todos los indicadores calculados a cada uno de los productores junto con el mapa de su lote de cacao, los resultados de laboratorio de suelos y los resultados del análisis fisicoquímico del grano y sensorial del licor de cacao.

Como consecuencia de las medidas de bioseguridad implementadas tras la pandemia mundial por la Covid-19 se replantearon los talleres de entrega de resultados que inicialmente incluía a otros miembros de la cadena productiva de cacao.

Se escribieron y sometieron artículos de investigación a revistas especializadas y eventos académicos evaluados por pares, estos son:

1. Anexo 9. A review of agent-based modeling for simulation of agricultural systems

Autores: Mora-Herrera D.Y., Huertas-Barrientos A., Zúñiga Escobar O.

Revista DYNA, 88(217), pp. 103-110, April - June, 2021.

DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.89133>

2. Anexo 10. A fuzzy logic based soil chemical quality index for cacao

Autores: Mora-Herrera D.Y., Guillaume S., Snoeck D., Zúñiga Escobar O.

Journal: Computers and Electronics in Agriculture 177 (2020) 105624

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105624>

3. Anexo 11. Fuzzy inference system as an aggregation operator application to the design of a soil chemical quality index.

Autores: Mora-Herrera D.Y., Guillaume S., Snoeck D., Zúñiga Escobar O.

Lesot MJ. et al. (eds) Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge Based Systems. IPMU 2020. Communications in Computer and Information Science, vol 1238. Springer, Cham.

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50143-3_35.

Finalmente se escribió este documento como requisito para optar por el título de Doctora en Ciencias Ambientales.

CAPÍTULO 3. DIAGNÓSTICO DE LA COMPLEJIDAD DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CACAO EN TRES ZONAS DEL TOLIMA

En este capítulo se presenta la concepción teórica de los subsistemas Suelo-Cultivo, Socio-económico y de Calidad de Cacao, los pasos y el modelo diseñado en GeoFIS para calcular el índice de complejidad de los sistema de producción de cacao, siguiendo la estructura de la Figura 6 y utilizando sistemas de inferencia difusa, conocimiento experto, datos de campo y análisis de laboratorio.

También se explica el funcionamiento del software GeoFIS para transformar los datos brutos de las variables de entrada (medidas en distintas unidades) a grados de satisfacción (una medida universal), los distintos operadores de agregación disponibles y como se define la base de reglas.

Posteriormente se presentan las razones que justifican la estructura jerárquica definida para calcular los índices de cada subsistema, las funciones de pertenencia de cada variable de entrada, la base de reglas y el operador de agregación empleado en cada caso.

Finalmente se presentan los cálculos matemáticos obtenidos con el modelo propuesto. Para la calibración de cada modelo se utilizaron los datos de las 10 fincas de Chaparral mientras que los datos de las otras 20 fincas (Ortega y Mariquita) se emplearon para la validación del modelo.

3.1. Concepción Teórica de los Subsistemas Suelo-Cultivo, Socioeconómico y de Calidad de Cacao

A continuación se detalla el modelo empírico propuesto para calcular el indicador de los subsistemas Suelo-Cultivo, Socioeconómico y de Calidad de Cacao, las razones teóricas y las limitaciones prácticas que fueron tenidas en cuenta, las variables de entrada seleccionadas y la fuente de los datos empleados en cada caso.

3.1.1. Diseño Teórico del Índice Propuesto para el Subsistema Suelo-Cultivo

El proceso de producción de cacao incluye diferentes actividades realizadas sistemáticamente desde la selección del sitio de plantación hasta la comercialización. En

ese sentido las condiciones del suelo son un parámetro importante para la producción sostenible y competitiva de cacao (Arthur, A.; Afrifa, A.A; Dogbatse, 2017).

A pesar de la dependencia que los agricultores tienen del entorno natural en el que se desarrollan sus cultivos, los procesos de toma de decisiones se ven alterados por la falta de información o conocimientos, aun cuando cuentan con datos disponibles.

Es posible hallar agricultores que fertilizan basándose únicamente en su experiencia, sin un soporte actualizado de las condiciones del suelo de su predio. Otros agricultores aplican los planes de manejo diseñados para otros predios que tienen el mismo cultivo, sin tener en cuenta que las condiciones del suelo pueden diferir entre predios e incluso dentro del mismo predio. Por otro lado, están los agricultores que cuentan con resultados de análisis de suelos, ya sea porque han sido parte de algún programa de transferencia de tecnología o porque los han hecho por cuenta propia, pero carecen de los conocimientos técnicos para interpretar los resultados y tomar una decisión informada respecto a la fertilización de su cultivo. Entonces, los datos no son suficientes y se necesita conocimiento experto para convertir los datos en información agronómica valiosa.

El proceso de toma de decisiones enfocadas en garantizar la sostenibilidad del suelo implica reconocer el suelo como un sistema natural complejo, vivo y dinámico compuesto por numerosas interacciones entre los procesos químicos, físicos y biológicos (Kelting et al., 1999; Liu et al., 2006). Procesos que son esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, tales como la producción de alimentos, el ciclaje de nutrientes, el almacenamiento de carbón y agua, flujos de filtrado, así como servir de hábitat para la actividad biológica (Vogel et al., 2019).

En agricultura, el interés principal en suelos se ha centrado en su potencial para aumentar o mantener la productividad de los cultivos (Kelting et al., 1999; Thakur & Sharma, 2019). Por lo tanto, la protección de este importante recurso y el mantenimiento de su capacidad para producir alimentos a largo plazo es un tema fundamental para la gestión de territorios sostenibles (Rincón Ruíz et al., 2015).

Para analizar la relación entre la producción agrícola y el suelo, se deben distinguir dos conceptos: fertilidad del suelo y productividad del suelo. El primero consiste en la calidad de un suelo que le permite proporcionar nutrientes en cantidades adecuadas y en buen equilibrio para el crecimiento de plantas o cultivos específicos (Soil Science Society of

America, 2008). Mientras que el segundo término se refiere a la capacidad de un suelo para alimentar una planta en particular o secuenciar una asociación de cultivos de plantas bajo un sistema específico de sistema de gestión (Duan et al., 2011; Soil Science Society of America, 2008).

Además es importante diferenciar entre la productividad de la tierra y el suelo para evitar considerarlos como sinónimos (Zhang et al., 2004). La productividad de la tierra corresponde al rendimiento por hectárea en función de la productividad del suelo, el clima y las prácticas de gestión agrícola. Mientras que la productividad del suelo está en función de factores inherentes como el material parental, la topografía, las propiedades físicas y químicas del suelo y la infraestructura para el riego y el drenaje, del conocimiento de quienes trabaja la tierra, los recursos financieros y la política gubernamental. De manera que mantener una productividad sostenible del suelo es fundamental para la seguridad alimentaria. Entonces aquí se empleará el término productividad del suelo para analizar las propiedades fisicoquímicas del suelo en función de los requerimientos del cultivo de Cacao.

Para evaluar la relación Suelo-Cultivo para soportar toma de decisiones de manejo, se sugiere un indicador que integra diversidad de elementos como alternativa a las mediciones directas de aspectos específicos, que rara vez se usan porque no son fácilmente interpretables por los productores.

Desde 1933, se ha desarrollado variedad de indicadores de productividad del suelo (Kelting et al., 1999). Recientemente estos indicadores se han enfocado en responder cómo el deterioro de la calidad del suelo reduce la productividad del suelo y los rendimientos de los cultivos (Duan et al., 2009, 2011; Gu et al., 2018). Los indicadores del suelo se basan en las propiedades medibles de los procesos del suelo o las plantas que muestran cómo el suelo puede funcionar a largo plazo para que un cultivo produzca mejor. Más específicamente, un índice de productividad del suelo es el resultado de interacciones complejas entre las propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos que afectan el cultivo (Kelting et al., 1999; Liu et al., 2006; Thakur & Sharma, 2019; Vogel et al., 2019).

Para integrar las propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos, son necesarios indicadores que tengan un efecto significativo y conocido sobre la productividad del suelo, estos normalmente suelen identificarse a partir de las relaciones entre cada propiedad o proceso y los rendimientos de los cultivos (Zhang et al., 2004).

Thakur & Sharma (2019) han descrito las propiedades físicas como aquellas que reflejan la capacidad del suelo para aceptar, almacenar, transmitir y distribuir agua, oxígeno y nutrientes. Estas propiedades no se consideran modificables fácilmente a corto plazo. La textura es la propiedad física más importante del suelo, además de la distribución del tamaño de poros, la estabilidad de los agregados, la conductividad hidráulica saturada, la infiltración, la densidad aparente y la corteza superficial (Y. García et al., 2012; Schoenholtz et al., 2000).

USDA (1996) definió las propiedades químicas como las condiciones que afectan las relaciones suelo-planta, estas son, calidad del agua, capacidad de amortiguación del suelo y disponibilidad de agua y nutrientes para plantas y microorganismos. Thakur & Sharma (2019) destacaron los indicadores químicos predominantes: pH del suelo, conductividad eléctrica, capacidad de adsorción, cationes disponibles y materia orgánica. El equilibrio de nutrientes también es importante porque determina la capacidad de soporte para el crecimiento del cultivo, el potencial del rendimiento del cultivo y el contenido de proteína del grano, de manera que cantidades excesivas pueden ser un riesgo ambiental potencial y pueden tener el efecto contrario al reducir la productividad del cultivo.

Las propiedades biológicas están relacionadas con las comunidades que habitan el suelo (flora, microbiota, macro, meso y microfauna) y son responsables de romper, transportar y mezclar el suelo. Por lo tanto, las funciones entre los procesos químicos, físicos y biológicos del suelo son interdependientes. Sin embargo, el efecto de las propiedades biológicas sobre las funciones del suelo no está completamente preestablecido para el cultivo de cacao (Y. García et al., 2012; Schoenholtz et al., 2000; Vogel et al., 2019).

Como sugerido por (Zhang et al., 2004) para considerar la complejidad sistemática de la productividad del suelo en condiciones naturales se requiere emplear un índice que obedezca a una evaluación integrada de los diversos factores indirectos, además de tener en cuenta la complejidad inherente de los sistemas de producción de cacao (complementariedad entre elementos y procesos que conducen a propiedades emergentes).

Debido a las interconexiones entre los procesos biológicos, químicos y físicos, especialmente los dos primeros, y para evitar la redundancia que implica considerar dos veces la relación entre las propiedades biológicas y la función del suelo para la producción de cacao, además de las limitaciones de conocimiento científico disponible respecto al

efecto de las propiedades biológicas sobre las funciones del suelo para el cacao, el factor biológico no se incluyó en el modelo propuesto para representar y evaluar el subsistema Suelo-Cultivo a escala de finca.

El manejo agrícola y el clima se consideran características inherentes de cada granja porque un cambio en ellos modifica tanto el suelo como el cultivo, por lo cual estos no se tuvieron en cuenta explícitamente en el índice propuesto.

El modelo difuso propuesto para calcular el Índice de subsistema de Suelo-Cultivo para los sistemas de producción de cacao tiene una estructura jerárquica como se muestra en la Figura 7, la primera fase para calcular este índice corresponde a la Fase 2 del sistema global para calcular el índice de complejidad de los sistemas de producción de cacao.

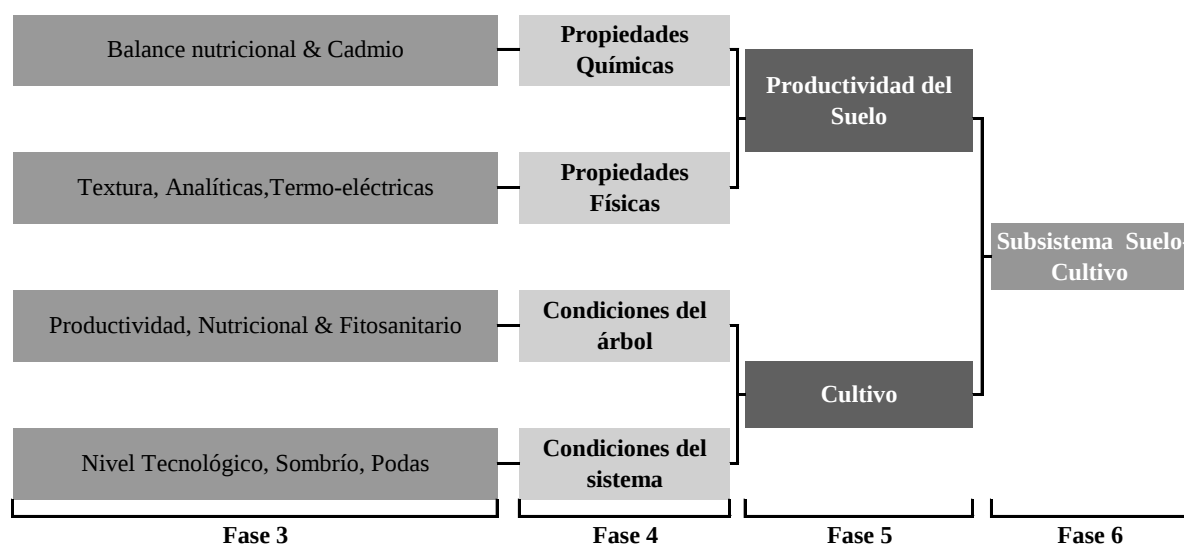


Figura 7 Estructura jerárquica para calcular el índice del subsistema Suelo-Cultivo a escala de finca para el cultivo de cacao

La Tabla 2 muestra los datos utilizados para generar las variables de entrada para calcular el índice del subsistema Suelo-Cultivo y la forma en que se recopilaban. Para cada variable agregada (primera columna) en la segunda columna se presentan los indicadores tomados como referencia de la variable de entrada. Por ejemplo, para el Balance Nutricional del suelo se emplearon los datos de las variables de entrada Macronutrientes, Materia orgánica y pH del suelo. La tercera columna presenta la fuente de datos primarios; por ejemplo, los valores de potasio intercambiable, fósforo disponible, materia orgánica y pH del suelo son directamente resultados de análisis de laboratorio, otros como la brecha de

equilibrio, el equilibrio de N y la saturación de bases corresponden a cálculos a partir de los resultados de laboratorio y con base en el conocimiento experto que sugiere dichas estimaciones.

Tabla 2 Fuente de las variables de entrada del subsistema Suelo-Cultivo

Variable Agregada	Variables de Entrada	Fuente
Textura	Arcilla y limos	Resultados análisis físico de suelos- Laboratorio
Analítico	Humedad, porosidad (poros totales y macroporos como proporción del total de poros), densidad aparente	Resultados análisis químico de suelos- Laboratorio
Termoeléctrico	Susceptibilidad magnética, conductividad térmica y resistividad eléctrica	Resultados análisis físico de suelos- Laboratorio y medición <i>in situ</i>
Balance Nutricional del Suelo	PH del suelo Macronutrientes: - Potasio intercambiable (K); - Fósforo disponible (P); - Brecha de equilibrio (8% K; 68% Ca; 24% Mg); -NGap:(N/Noptimum=((K+Ca+Mg) +6,15)/ 89); -Saturación de Bases: (K+Ca+Mg+Na)/CEC*	Datos por resultados de laboratorio y relaciones calculadas a partir de (Snoeck et al., 2016)
Cadmio (Cd)	Materia orgánica Cadmio en el suelo	Resultados de laboratorio
Productividad	Floración y Mazorcas Producción anual dividida en árboles totales.	Valoración del ing. agrónomo <i>in situ</i> e información del agricultor
Nutrición del cultivo	Calidad de las mazorcas, ramas, troncos y hojas.	Valoración del ing. Agrónomo <i>in situ</i>
Fitosanidad	Identificación de plagas y enfermedades presentes en tres puntos de observación del cultivo y su nivel de daño en las mazorcas y en el árbol	Valoración del ing. Agrónomo <i>in situ</i>
Tecnología	Condiciones de infraestructura para el cultivo, la cosecha y la pos cosecha. Implementación de un plan de fertilización.	Valoración del ing. agrónomo y autoevaluación del agricultor sobre sus prácticas de fertilización
Poda	Cantidad de ramas en los árboles de cacao, su altura y calidad de las podas	Valoración del ing. agrónomo
Sombrío	Altura, frondosidad y cantidad de árboles de sombrío	Valoración del ing. agrónomo

* Capacidad de intercambio Catiónico

La resistividad eléctrica fue medida en campo usando un equipo terminal earth resistance and soil resistivity tester marca Megger tipo DET4TR2, utilizando el método de Wenner.

3.1.2. Diseño Teórico del Índice Propuesto para el Subsistema Socioeconómico

La producción de cacao involucra relaciones sociales y económicas en constante evolución que permiten garantizar la permanencia de los sistemas productivos en el tiempo, razón por la cual el índice de complejidad propuesto en esta investigación incluye el subsistema socioeconómico.

En los principales países productores, los productores de cacao se caracterizan por tener bajo nivel de escolaridad, edad promedio por encima de los 50 años y bajo relevo generacional, viven en comunidades con calidad deficiente de servicios básicos (salud, educación, agua, electricidad, saneamiento), y son generalmente agricultores de subsistencia, esto es, que además de cacao cultivan alimentos básicos como principal fuente de ingresos monetarios para suplir las necesidades del hogar (Beg et al., 2017).

Zonas con infraestructura logística rezagada y con pocos comercializadores encargados de gestionar los flujos de cacao hacia las empresas procesadoras del grano, tienen altos costos de transacción, e inclusive los comerciantes locales sacan provecho de su poder de compra para externalizar sus costos logísticos, lo que se traduce en bajos precios pagados al productor, que a su vez se traduce en limitados ingresos monetarios para subsistir y reinvertir (fertilización o renovación de árboles) en el sistema productivo, perpetuando las técnicas de producción tradicionales y las obsoletas (Abbott et al., 2018; Beg et al., 2017).

A diferencia de otros países, donde existen los comerciantes que viajan a fincas remotas para comprar el cacao directamente en las fincas, en Colombia los productores, generalmente ubicados en lugares lejanos, muchas veces sin vías de acceso o en muy mal estado, llevan el grano producido hasta donde comerciantes más grandes que tienen relaciones con las dos empresas que acaparan el mercado a nivel nacional, Nutresa y Casa Lúker, por lo tanto los productores desconocen el precio que les van a pagar, y deben asumir el esfuerzo y el costo de mover grandes volúmenes de cacao (Abbott et al., 2018).

Por lo tanto, con el fin de valorar las condiciones socioeconómicas de los sistemas de producción de cacao, se propone la estructura jerárquica que se presenta en la Figura 8. Se

integran variables Sociales, Económicas y de Gestión y Administración asociadas a la producción de cacao que buscan concebir elementos particulares de cada subsistema, y sus interacciones, a nivel de finca.

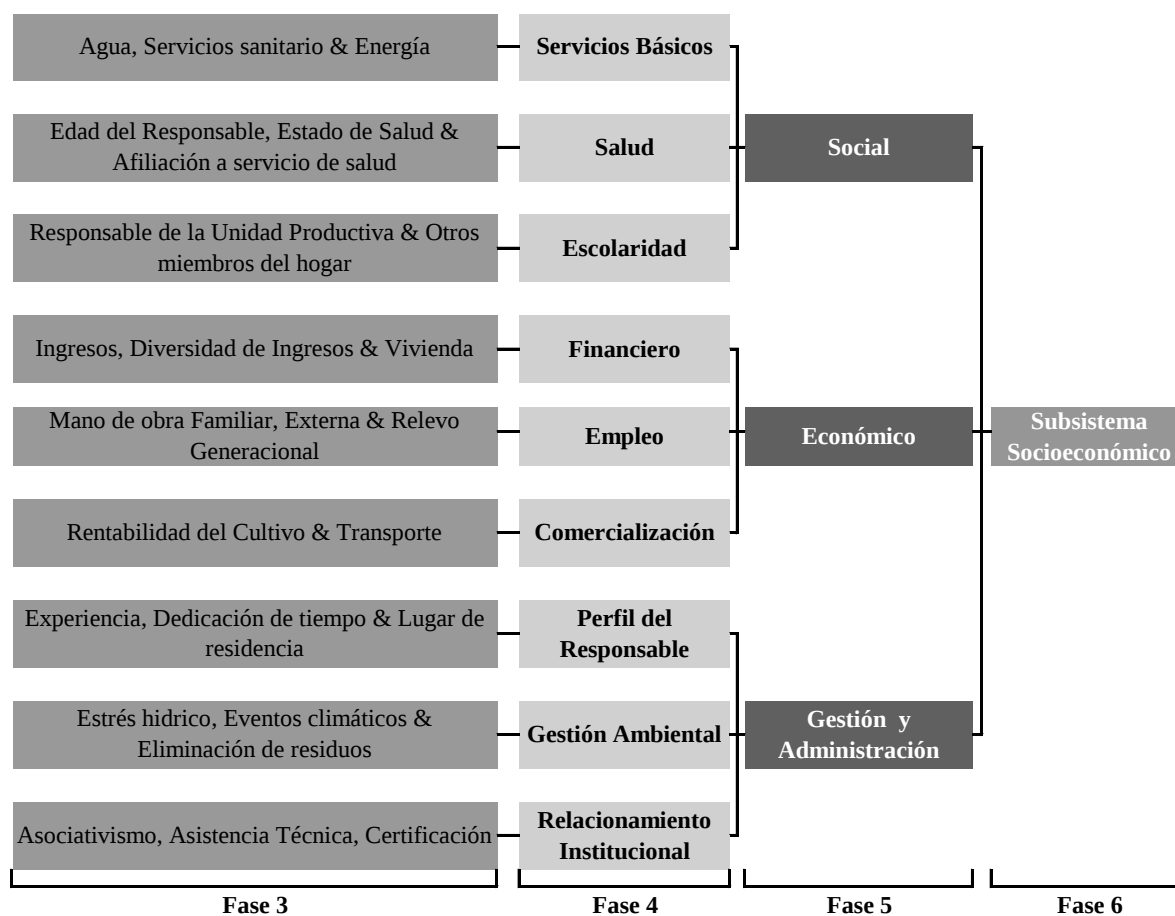


Figura 8 Estructura jerárquica para calcular el índice del subsistema socioeconómico a escala de finca

En la Tabla 3 se presentan las variables de entrada (Fase 3) requeridas para calcular la variable agregada en la fase siguiente así como el indicador tomado como referencia en cada caso y la fuente de los datos que pueden ser las repuestas obtenidas en la Encuesta o en la Entrevista estructurada aplicadas al encargado de la Unidad Productiva (UP).

Tabla 3 Origen de las variables de entrada del subsistema Socioeconómico

Variable Agregada	Variable de Entrada	Indicador de Referencia	Fuente
Servicios Básicos	Agua	Fuente del agua para consumo humano en la finca	Encuesta
	Servicio Sanitario	Tipo de servicio sanitario con que cuenta la finca	
	Energía	Disponibilidad de Electricidad Energía/combustible principal para cocinar en la finca	
Salud	Edad del responsable de la UP	Número de Años	Entrevista
	Estado de Salud física	Satisfacción con su estado de salud	
	Afiliación a servicio de salud	Tipo de afiliación	Encuesta
Escolaridad	Alfabetización del responsable de la UP	Grado más alto cursado	Encuesta
	Alfabetización de los demás miembros del hogar	Promedio del grado más alto cursado	
Financiero	Ingresos	Cantidad Ingresos por Cacao Capacidad de los Ingresos totales para cubrir gastos	Encuesta
	Diversidad de fuentes de Ingresos	Cantidad de fuentes de ingresos	
	Vivienda	Material predominante de las paredes exteriores	
Empleo	Mano de obra familiar (MOF)	Personas del hogar que trabajan en la finca/Personas del hogar que podrían trabajar en la finca	Encuesta
	Mano de obra externa (MOE)	Disponibilidad de población para trabajar en la finca	Entrevista
	Relevo generacional	Interés de población < 30 años por trabajar en Cacao	
Comercialización	Rentabilidad del cultivo de cacao	Relación Precio de venta/ Precio de equilibrio	Calculado a partir de datos de la Encuesta
		Generación de valor agregado	Valoración del agrónomo en la visita a la finca
		Percepción de rentabilidad	Entrevista
	Transporte	Tiempo hasta el mercado	Encuesta y registro tomado en la visita de campo
		Costo Condiciones de la vía Tenencia y tipo de transporte	
Perfil del Responsable de UP	Experiencia en el cultivo	Años como productor de Cacao	Encuesta
	Dedicación	De tiempo al cultivo En capacitación sobre cacao	Entrevista

	Residencia	Lugar de residencia	Encuesta
Gestión Ambiental	Falta de agua en el cultivo	El cultivo de cacao sufre por falta de agua	Encuesta
	Incidencia de eventos climáticos	Afectación por eventos climáticos	
	Gestión de residuos	Forma principal para eliminar basura en la finca	
Relacionamiento Institucional	Asociativismo	Tipo de participación dentro de la asociación	
	Asistencia técnica	Calidad de la asistencia técnica	
	Certificación	Cuenta con algún tipo de certificación	

3.1.3. Diseño Teórico del Índice Propuesto para el Subsistema Calidad de Cacao

La organización internacional de cacao, ICCO por sus siglas en inglés, resalta que el mercado internacional de cacao distingue entre cacao ordinario y el de fino y aroma, esta diferenciación obedece a la combinación de material genético sembrado, el color y el sabor de los granos y la almendra de cacao. La formación del sabor de los granos de cacao está asociado a las prácticas de pos cosecha (despulpado, fermentación, secado, tostión, almacenamiento y transporte) el tipo de suelo y la edad de los árboles de cacao, entonces el genotipo de los árboles incide, pero no es suficiente, para que los granos tengan un buen perfil de sabor si se han tenido inadecuadas prácticas de pos cosecha (Kongor et al., 2016).

En 2016, según las cifras de FAOSTAT, los principales productores de grano fueron los países africanos (67,2%) y de América Latina-ALC- (16,3%), este último muy cerca de la región asiática (15,3%). Mientras que los principales líderes de producción de derivados del cacao a nivel global son Reino Unido, Gana, Costa de Marfil, Bélgica y Suiza. El 57,4% del mercado del chocolate ha sido controlado por 5 compañías, destacándose Cargill (US), Archer-daniels-midland (US) y Barry Callebaut (Suiza) (Beg et al., 2017).

Sin embargo, solo el 5% de la producción mundial de cacao es considerada como de sabor fino (Homann, 2016). ALC tiene un importante papel en ese segmento del mercado con el 80% de la producción mundial, y específicamente en el caso colombiano, 95% de la producción nacional tiene potencial para ser catalogada como fina y de aroma, segmento del mercado que tiene una tasa de crecimiento anual de 9% (Gómez-García Palao & Vignati, 2016; The International Cocoa Organization, 2016).

No obstante, la delimitación de este segmento es aún ambigua para fines prácticos, por lo cual aunque representa grandes oportunidades también implica fuertes desafíos para los pequeños productores de ALC.

Además de la volatilidad del precio nacional e internacional del cacao, influenciados por factores como variabilidad climática, plagas y enfermedades, especulación e inestabilidad política en los países productores, haciendo por un lado que la inversión en cacao sea muy riesgosa para productores a pequeña escala y por otro lado, que aunque los precios aumenten los productores no capten un precio justo; en el occidente de África, por ejemplo, los productores solo reciben entre el 3,5% y el 6,4% del valor final de una barra de chocolate (Beg et al., 2017). Esto es especialmente cierto en ALC, donde los pequeños productores venden el cacao como *commodity* a intermediarios (Swisscontact, 2016).

A nivel global, el bajo acceso a la información de mercado y la participación en grandes mercados y el uso de técnicas de producción, cosecha y pos cosecha anticuados generan una amplia brecha de calidad entre lo que requiere el mercado y lo que efectivamente le llega. De manera, que para proveer la calidad requerida por el mercado es necesario investigar en las pequeñas fincas y empoderar a los productores a pequeña escala, de lo contrario la industria no tendrá la cantidad y calidad de cacao necesaria para abastecerse (Beg et al., 2017).

Asimismo, la producción de un grano de mejor calidad aumenta la propensión a tener cultivos más rentables porque la industria nacional e internacional cada vez es más exigente en calidad y más conscientes de pagar por ella (Cubillos et al., 2008).

Sin embargo, en el caso colombiano el diferencial de precio por la calidad puede ser tan baja como COP \$200 (Abbott et al., 2018). Incluso en el caso del Tolima los productores consideran que los esfuerzos para garantizar una calidad superior (control fitosanitario, riego, fertilización, manejo de suelos etc.) no son reconocidos por el mercado, de manera que esto favorece que se sigan realizando las prácticas tradicionales, aun cuando son conscientes que no son las adecuadas.

En la literatura, las evaluaciones de calidad de cacao generalmente se refieren al análisis de criterios bioquímicos como polifenoles, compuestos volátiles, metabolitos, entre otros, como se puede encontrar en (Kongor et al., 2016; Machado Cuellar et al., 2018; Servent et al., 2018). Si bien este tipo de información es fundamental para evaluar la calidad del grano

a nivel científico en el área de alimentos, su uso para fines prácticos en el mercado es restringido porque resulta ser de difícil manejo para productores y otros individuos que intervienen en el mercado y que no cuentan con los equipos necesarios para llevar a cabo esas mediciones, ni dominan los aspectos teóricos.

De manera práctica actualmente el mercado nacional usa la prueba de corte y evaluación física del grano conforme los parámetros definidos por la NTC 1252, no obstante, desde la percepción humana, la evaluación sensorial del licor apoya la definición de perfiles de sabor para tener una imagen más completa de la calidad del producto (Muñoz, 2002).

Dado que la prueba de corte se limita a los defectos más evidentes, amargo excesivo, astringencia por granos mal fermentados, moho por granos secados inadecuadamente, entonces no es un indicador lo suficientemente fiable de calidad de cacao, sino que además se debe tener en cuenta un criterio clave de calidad como es el sabor, esto incluye la intensidad de sabor a chocolate, la presencia de sabores secundarios positivos (florales y frutales) y la ausencia de sabores indeseados (CAOBISCO/AEC/FCC, 2015).

Entonces el índice de calidad de cacao propuesto en esta investigación integra los criterios para clasificar el cacao en grano a partir de la denominada prueba de corte según la NTC 1252; los resultados del análisis sensorial del licor de cacao efectuado por un panel de catadores expertos y la información referente a las prácticas de beneficio (despulpado, fermentación, secado, almacenamiento) que desarrollan los productores y que inciden en la calidad final del producto comercializado.

Los atributos de sabor considerados para evaluar el licor de cacao a través análisis sensorial, corresponden a los tenidos en cuenta por investigaciones como (Afoakwa et al., 2008; CAOBISSCO/AEC/FCC, 2015; Quintana Fuentes et al., 2018; Sukha et al., 2008).

Adicionalmente, como precursores de sabores desagradables se señalan las falencias en las prácticas de beneficio (cosecha, pos cosecha y almacenamiento), por ejemplo, una fermentación prolongada puede generar moho pero una falta de fermentación puede resultar en exceso de amargo y astringencia, un secado lento puede provocar moho pero si es demasiado rápido puede dar un sabor ácido excesivo, el almacenamiento en condiciones muy húmedas puede generar moho o si se almacena cerca de una fuente de contaminación el cacao puede absorber olores desagradables como combustible, cemento, humo etc. (CAOBISCO/AEC/FCC, 2015).

La estructura jerárquica para calcular el índice de calidad de cacao propuesto, usando sistemas de inferencia difusa, obedece al esquema que se presenta en la Figura 9.

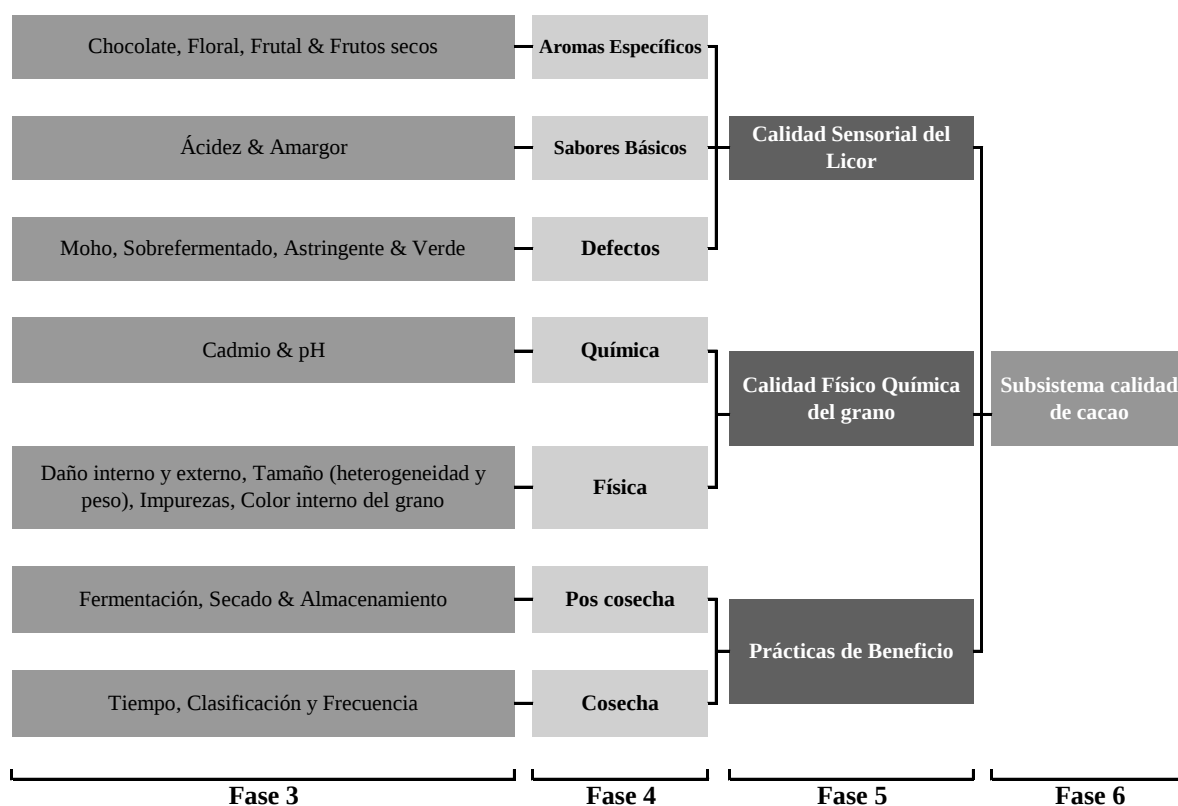


Figura 9 Estructura jerárquica para calcular el índice del subsistema Calidad de Cacao a escala de finca

Una vez identificados los atributos (variables de entrada) que integran cada variable agregada se definió la fuente de los datos requeridos para llevar a cabo los cálculos matemáticos siguiendo el orden de agregación de la Figura 9, esta información se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4 Fuente de las variables de entrada del subsistema Calidad de Cacao

Variable Agregada	Variables de Entrada	Fuente
Aromas Específicos	Chocolate, Floral, Frutal & Frutos Secos	Resultados evaluación sensorial por parte de expertos de la Universidad de Antioquia
Sabores Básicos	Amargo & Ácido	
Defectos	Moho, Sobrefermentado, Astringente & Verde	
Química	Cadmio & pH	Resultados de análisis de metales pesados y cuantificación de acidez

		volátil.
Física	Color interno, Daño interno y externo y Tamaño del grano & Impurezas	Resultados prueba de corte con 500g tomados aleatoriamente de la muestra
Pos cosecha	Fermentación, Secado & Almacenamiento	Informado por el Productor en la entrevista
Cosecha	Tiempo, Clasificación & Frecuencia	

3.2. Modelación en GeoFIS

Para el procesamiento de los datos se empleó el software gratuito GeoFis (*Data Fusion - GeoFIS*, n.d.).

Se requieren dos pasos para calcular un indicador utilizando FIS, el primero consiste en convertir los datos brutos a grados de satisfacción de acuerdo con una relación de preferencia asociada a cada variable. El segundo se refiere a la agregación de todos los grados de satisfacción para una alternativa dada (una finca en este caso) para calcular una puntuación integrada. Finalmente, las alternativas se pueden clasificar según el puntaje obtenido.

3.2.1. Paso 1: De los Datos Brutos a Grados de Satisfacción

Para pasar de los datos brutos a grados de satisfacción la primera condición es que todos los grados deben tener la misma escala. En este caso se emplea el intervalo entre 0 y 1, se asigna 0 cuando el criterio no se cumple en absoluto y 1 cuando se cumple completamente, y toma cualquier > 0 y < 1 cuando presenta algún nivel de cumplimiento.

Tomando como ejemplo la variable de entrada Materia Orgánica (OM), que hace parte de la variable agregada Balance Nutricional del Suelo, se define la función de pertinencia según (Rojas & Sacristán Sánchez, 2013). Cualquier valor menor que 3% de OM tiene 0 como grado de satisfacción, mientras que un valor mayor que 5% se le asigna 1 como grado de satisfacción, si la OM en una finca está entre 3% y 5% el grado de satisfacción se calcula como una variación lineal así: $(\text{dato de campo} - \text{límite inferior del intervalo de aptitud}) / (\text{valor mínimo óptimo de aptitud} - \text{límite inferior del intervalo de aptitud})$.

En la Figura 10 se presenta el ejemplo de una finca cuyo contenido de OM es 4,72%, lo que en grados de satisfacción equivale a $(4,72\% - 3\%) / (5\% - 3\%) = 0,86$.

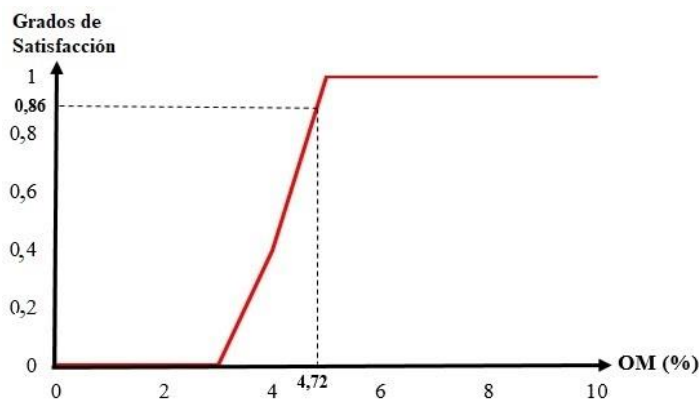


Figura 10 Función de transformación de datos en bruto a grados de satisfacción para materia orgánica

Las funciones de transformación se definen con base en el conocimiento experto para cada variable de manera individual. En este caso los rangos numéricos que se definieron para todas y cada una de las variables de entrada incluyen información de diferentes instituciones y zonas donde se cultiva cacao en el mundo, como Costa de Marfil y Ghana (Snoeck et al., 2010, 2016), Colombia (Instituto Colombiano Agropecuario, 2012; Pinzón Useche et al., 2012; Rojas & Sacristán Sánchez, 2013), Nicaragua (Larios González, 2014) y Latinoamérica en general (Arthur, A.; Afrifa, A.A; Dogbatse, 2017; Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017).

3.2.2. Paso 2: Agregación de Variables. Operadores de Agregación

En GeoFIS se implementan dos tipos de operadores de agregación numérica: media aritmética ponderada –WAM-, promedio ponderado ordenado –OWA. Por otra parte, un operador tipo de FIS también está disponible.

WAM es el más utilizado en aplicaciones de análisis de criterios múltiples, y consiste en asignar un peso a cada variable según su importancia, la suma de los pesos debe ser uno. Supone que los elementos de un sistema tienen un comportamiento lineal y que los criterios son independientes, lo que significa que las interacciones no se pueden modelar. Matemáticamente, se representa como en [1]:

$$\psi(a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n w_i a_i, \quad w_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad [1]$$

OWA se usa para asignar pesos a las ubicaciones en la distribución de los grados de satisfacción, de mínimo a máximo, sin tener en cuenta las fuentes de información. En (Yager, 1988) la agregación OWA de una colección de argumentos numéricos, $(a_1, \dots, a_n)$, se define como:

$$\psi(a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n w_i a_{(i)}, \quad w_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad [2]$$

Donde $(.)$ es una permutación tal como $a_{(1)} \leq \dots \leq a_{(n)}$.

Como ejemplo práctico se toma el caso de Balance Nutricional, se suponen que las variables de entrada, Macronutrientes, Materia Orgánica y pH, tienen valores en grados de satisfacción igual a 0,9, 0,45 y 0,8, respectivamente.

Suponiendo que se asigna un peso de 0,5 a Macronutrientes, 0,3 a Materia Orgánica y 0,2 a pH; Con WAM la variable de salida es: Balance Nutricional = $(0,9 \cdot 0,5) + (0,45 \cdot 0,3) + (0,8 \cdot 0,2) = 0,745$.

Dado que con OWA se asignan los pesos de mayor a menor, conforme la magnitud de la variable de entrada hasta completar 1, entonces Balance Nutricional = $(0,9 \cdot 0,5) + (0,8 \cdot 0,3) + (0,45 \cdot 0,2) = 0,78$

Finalmente está el FIS, que por lo general, requiere más parámetros que WAM y OWA, pero en este caso como todas las variables de entrada comparten la misma escala (0 a 1) y el mismo significado, se utilizan fuertes y regulares particiones difusas (Bajo y Alto) para garantizar la integridad semántica y simplificar la fusión de datos para todos los casos.

La partición difusa de una variable de entrada generada automáticamente se muestra en la Figura 11. Cualquier grado de satisfacción ($0 < x < 1$) pertenece parcialmente a los dos conjuntos difusos con un nivel complementario. Por ejemplo, un valor de 0,8 en grados de satisfacción de la variable OM (4,6% en datos en bruto) pertenece al conjunto difuso Alto en 0,8 y en 0,2 al conjunto difuso Bajo.

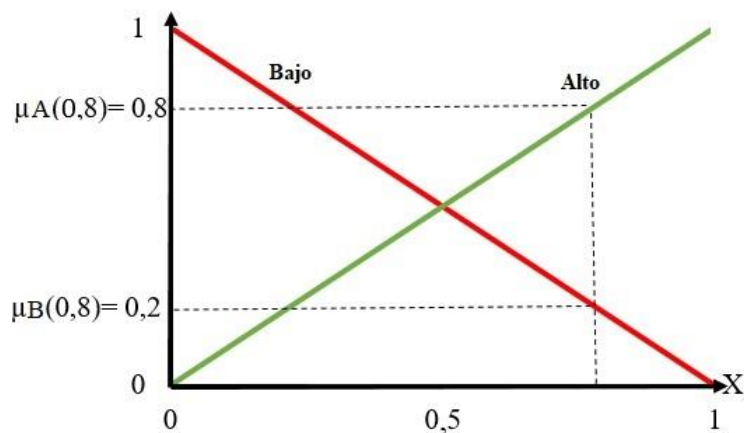


Figura 11 Pertenencia de la variable de entrada OM con dos particiones difusas

Una vez definida la granularidad de las variables de entrada, Bajo y Alto en este trabajo, deben determinarse las conclusiones de las reglas de decisión para agregar dos o más variables de entrada, la cantidad de reglas posibles es el producto del número de etiquetas lingüísticas (granularidad) al exponente del número de variables de entrada. En el caso de la variable agregada Balance Nutricional del Suelo, que resulta de combinar 3 variables de entrada, la cantidad de posibles reglas es $2^3 = 8$.

Cuando la agregación es de solo dos entradas, o cuando hay más de dos entradas pero no se dispone de una referencia científica que documente el tipo de interacciones entre las variables de entrada, se empleó WAM como operador de agregación, con una asignación de pesos a criterio de los científicos expertos que apoyaron cada Factor (Agrónomo, Economista, Ing. Alimentos).

3.2.3. Paso 2: Agregación de Variables. Conclusiones de Regla

Posteriormente se definen las conclusiones de las reglas. Las reglas difusas se refieren al conjunto de proposiciones SI- ENTONCES que modelan el problema a resolver, de modo que la base de reglas de un sistema general se define de la siguiente manera:

$$\text{SI } X^1 \text{ es } A_r^1 \text{ Y } X^2 \text{ es } A_r^2 \text{ Y } \dots X^p \text{ es } A_r^p \text{ ENTONCES Y es } B^r$$

Donde X son variables de entrada, A_r^p es el conjunto difuso de la $p^{\text{ésima}}$ variable de entrada empleada dentro de la $r^{\text{ésima}}$ regla, Y es la variable de salida y B^r es el valor de la $r^{\text{ésima}}$ conclusión a la regla.

Las reglas describen las interacciones entre variables en un contexto particular, de manera que la conclusión refleja el conocimiento experto sobre dicho contexto. Para la variable agregada Balance Nutricional, por ejemplo, las reglas se pueden definir como:

SI Macronutrientes es Bajo (Alto) **Y** Materia Orgánica es Baja (Alta) **Y** pH del suelo es Bajo (Alto) **ENTONCES** Balance Nutricional del Suelo es **CONCLUSIÓN**

Entonces una variable de entrada puede activar varias reglas. El valor inferido resulta de las combinaciones determinadas en las conclusiones de las reglas.

GeoFIS ofrece dos tipos de conclusiones, *crisp* y *fuzzy*. La conclusión de regla difusa (*fuzzy*) está restringida a una etiqueta lingüística (por ejemplo, Alto o Bajo), por lo tanto, es necesario definir tantas etiquetas como conclusiones se quieran obtener, mientras que una conclusión nítida (*crisp*) puede tomar cualquier valor dentro del intervalo de la unidad, permitiendo mayor diversidad que las conclusiones difusas.

Como una variable de salida de una fase puede servir como variable de entrada en una fase posterior, para calcular el índice propuesto se prefirieron las salidas numéricas, entonces, las conclusiones de regla tipo *crisp* fueron seleccionadas.

Los resultados generados por el modelo empírico corresponden a valores no dimensionales, con un rango de magnitud entre 0 y 1, entre más cerca a 1 significa mayor complejidad de las interacciones entre los elementos que integran el sistema de producción, y entre más cercano a 0 menor complejidad.

3.2.4. Calibración y validación del modelo

El modelo empírico propuesto pretende generar conocimiento y explicar la realidad observada en campo. Los parámetros se estimaron a partir del conocimiento experto,

específicamente, las funciones de pertenencia fueron definidas con base en literatura especializada disponible previamente.

La calibración consistió en verificar que el modelo proporcionase una adecuada representación de los datos recolectados en 10 fincas de una misma zona, para ello se revisó que los valores calculados por el modelo fuesen coherentes con la realidad observada en campo y la capacidad explicativa de la misma. Se confirmó el funcionamiento computacional del modelo (subsistemas) en FISpro a fin de descartar algún problema intrínseco del modelo, ya fuera por un error en la definición de las funciones de pertenencia o en la asignación de las conclusiones de las reglas. Se llevó a cabo el análisis de sensibilidad flexibilizando los rangos de las funciones de membresía de algunas variables de entrada y alterando los valores asignados a las conclusiones de las reglas (respetando la jerarquía de las variables de entrada), a partir de los resultados obtenidos se realizaron ajustes al modelo.

Para la validación se empleó el modelo ajustado con datos de 20 fincas diferentes, de otras 2 zonas. Se contrastaron los resultados con el comportamiento conocido a través de la experiencia de los sistemas estudiados, una vez se confirmó que los valores calculados para cada finca eran coherentes con la realidad observada por los investigadores se presentaron los resultados preliminares para el aval de cada productor y explorar la validez del conocimiento extraído de la interpretación de las salidas obtenidas.

3.3. Comportamiento y Resultados Matemáticos de los Subsistemas Suelo-Cultivo, Socioeconómico y Calidad de Cacao

En este apartado se presentan los resultados finales obtenidos para cada uno de los tres subsistemas (Suelo-Cultivo, Socioeconómico y Calidad de cacao) que configuran el indicador de complejidad del sistema de producción de cacao.

El conocimiento experto, materializado en literatura disponible y la orientación de investigadores, fue tomado en cuenta durante el proceso de modelación para: 1) seleccionar las variables a usar, 2) organizar jerárquicamente las variables de entrada y las variables agregadas intermedias, 3) diseñar la función de transformación de cada variable de entrada,

4) definir las conclusiones de regla de manera que se consideren las interacciones lineales y no lineales entre variables y 5) interpretar los resultados.

A continuación se muestra:

- La estructura jerárquica para calcular cada una de las variables agregadas,
- La justificación para priorizar y emplear las variables de entrada seleccionadas,
- Las formas y tipos de función de pertenencia de cada variable de entrada,
- Las conclusiones de regla y operador empleado en cada proceso de agregación,
- Los resultados matemáticos del índice final para Chaparral (calibración del modelo) de los subsistemas Suelo-Cultivo, Socioeconómico y Calidad de cacao, y posteriormente, los resultados utilizando los datos de Mariquita y Ortega (validación del modelo), toda vez que se confirmó que los resultados del modelo eran consistentes con las observaciones de campo.

Con el fin de categorizar los resultados para facilitar su interpretación y comprensión se estableció la escala de la Tabla 5, los rangos fueron definidos a criterio de los autores:

Tabla 5 Escala categórica para clasificación de resultados arrojados por GeoFIS

Categoría	Muy Bajo	Bajo	Medio Bajo	Medio	Medio Alto	Alto	Muy Alto
Intervalo	0 – 0,1	0,11 – 0,3	0,31 – 0,45	0,46- 0,55	0,56 – 0,69	0,7- 0,85	0,86- 1

3.3.1. Resultados del Subsistema Suelo- Cultivo

El primer resultado de investigación correspondió a la georreferenciación del lote de cacao y de los puntos de muestreo en cada finca, los mapas generados de todas las fincas están disponibles en el Anexo 5.

A continuación se presenta el comportamiento y los resultados matemáticos del subsistema Suelo-Cultivo, que obedece a la agregación de las propiedades físico-químicas del suelo (Variable Productividad del Suelo) y las características nutricionales, productivas y fitosanitarias del cultivo de cacao al momento de la visita a las fincas (Variable Cultivo). Posteriormente se describen los procedimientos realizados para generar cada una de las variables intermedias requeridas para generar la variable de salida del subsistema Suelo-Cultivo, y se explican los resultados obtenidos.

3.3.1.1. Georreferenciación del Cultivo de Cacao en las Zonas de Estudio.

Las fincas correspondientes al municipio de Chaparral se ubicaron en las veredas Pedregal, Maito, Copete Delicias, Mulicú Delicias, Cimarrona Baja, Buenos Aires, Icarco y Paraíso, las cuales están resaltadas en negro en la Figura 12.

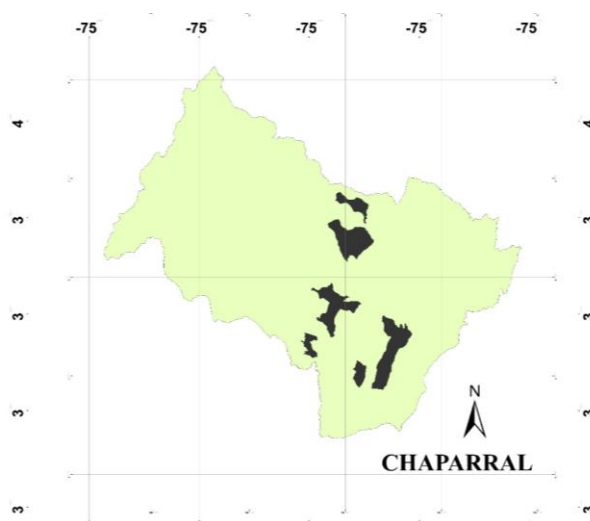


Figura 12 Localización de las fincas estudiadas en Chaparral

En el caso de Ortega las fincas analizadas están localizadas en las veredas Copial, El Porvenir, Pilu, Llovedero, San Gregorio, Samaria, Guayaquil y Paloma, las mismas se resaltan en la Figura 13.

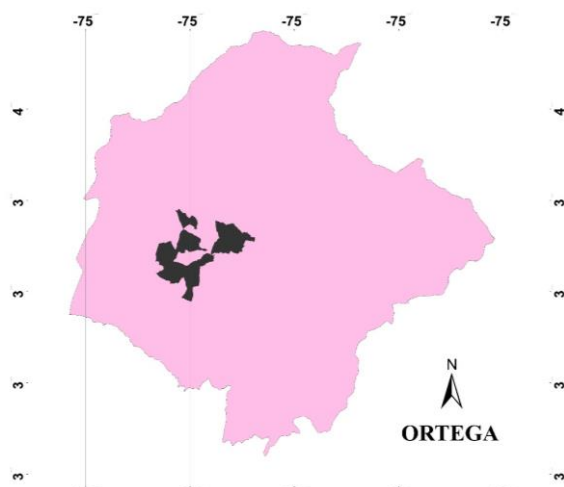


Figura 13 Localización de las fincas estudiadas en Ortega

En el municipio de Mariquita las fincas estudiadas corresponden a las veredas Camelias, El Hatillo, La Parroquia, La Mesa, Carrizales, El Mercado, Cariano, La Cabaña, Quebrada Honda y Fátima, como muestra la Figura 14.

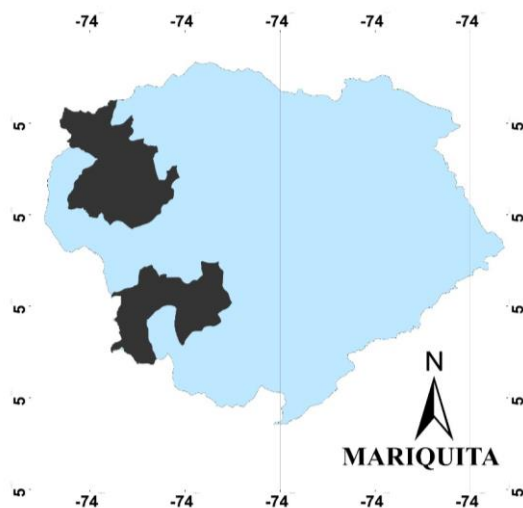


Figura 14 Localización de las fincas estudiadas en Mariquita

3.3.1.2. Comportamiento del Subsistema Productividad del Suelo.

La variable productividad del suelo para el cultivo de cacao agrega las propiedades químicas y físicas del suelo, y hace parte de la Fase 5. El cálculo del indicador del subsistema Suelo-Cultivo (Ver Figura 7) sigue la estructura jerárquica de la Figura 15.

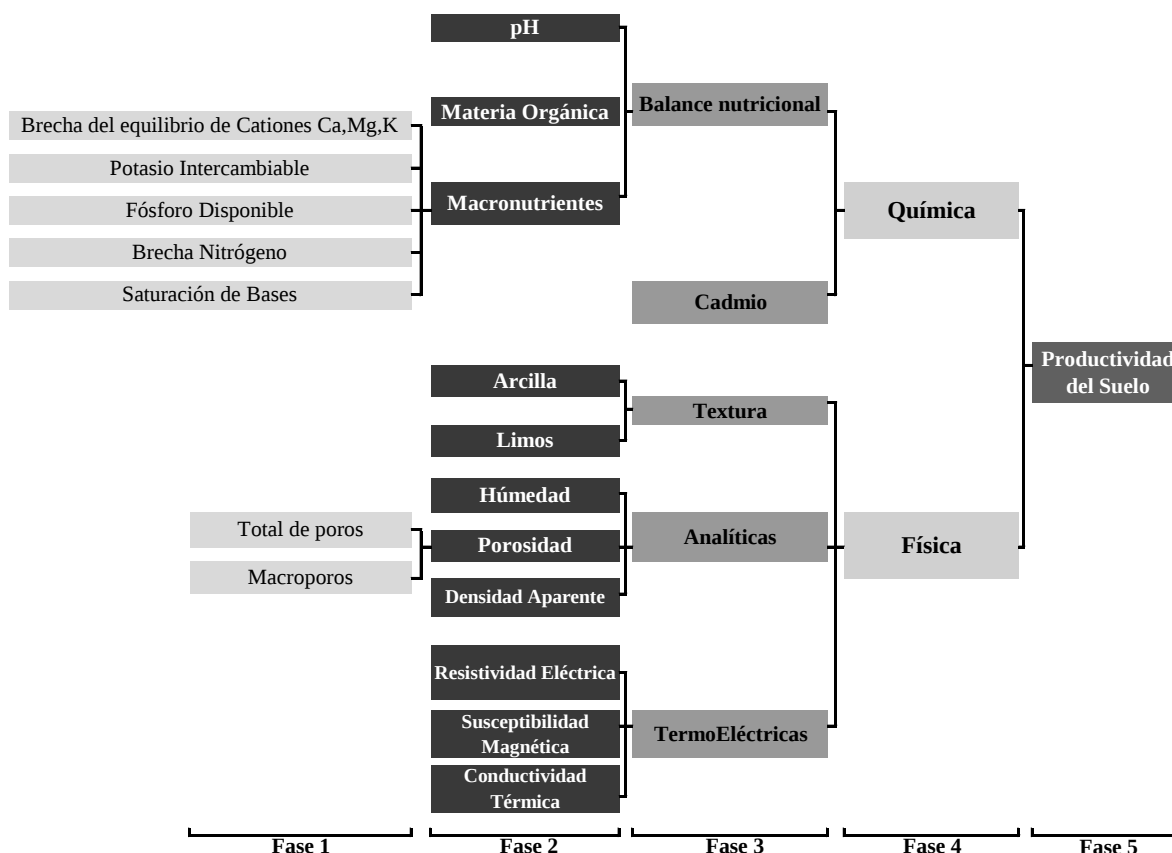


Figura 15 Estructura jerárquica del subsistema Productividad del suelo

A continuación se describen los procedimientos realizados en cada una de las fases precedentes al cálculo de la variable Productividad del suelo. En la Figura 16 se presenta la estructura jerárquica para calcular la variable Química.

El pH del suelo es la variable con mayor peso para calcular la variable Balance Nutricional porque depende de la naturaleza del suelo y controla los procesos químicos que en él ocurren, específicamente, la disponibilidad y absorción de nutrientes. Los árboles de cacao crecen en suelos ácidos (4,6 – 7,5), sin embargo la mayor limitación ocurre cuando el pH es inferior a 5,0 porque generalmente son suelos que carecen de Calcio (Ca).

La materia orgánica favorece el ciclaje de nutrientes, entonces es esencial para la fertilidad y la estabilidad del suelo, especialmente en las fincas de mayor pendiente, dada su importancia para el cultivo de cacao se consideró pertinente separarla de otros macronutrientes y es la segunda variable que más aporta al Balance Nutricional.

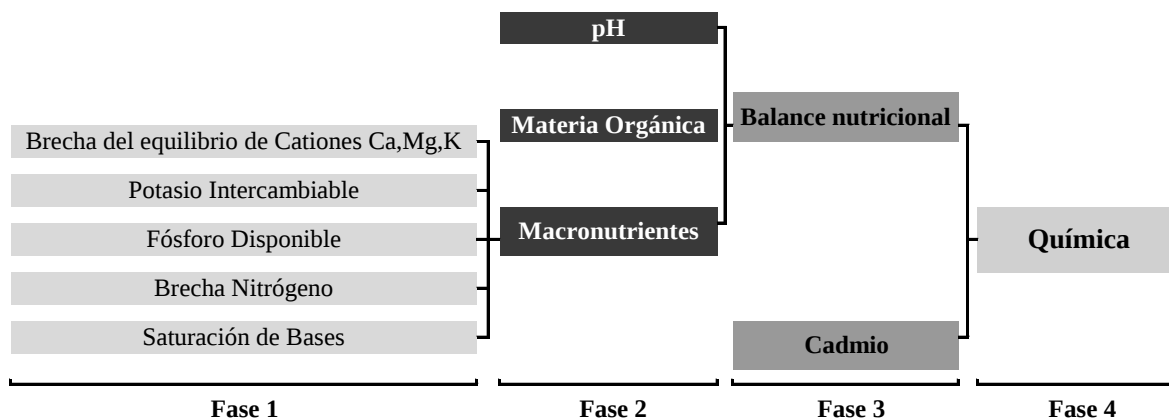


Figura 16 Estructura Jerárquica para Calcular la Variable Química

La variable Macronutrientes se calculó combinando las siguientes variables de entrada:

- Brecha del equilibrio de Cationes Calcio (Ca), Mg (Magnesio) y K (potasio): Ca es importante para el desarrollo de yemas y flores terminales, mientras que Mg es esencial para el proceso de fotosíntesis y K es crucial para el desarrollo fisiológico del cacao, particularmente para el desarrollo y la maduración de las mazorcas. La presencia de K es esencial en el suelo independiente de todos los demás macronutrientes, sin embargo, Ca y Mg son importantes para el cultivo de cacao en términos de su equilibrio respecto a K, de manera que se respeten los umbrales óptimos que son: 68% de Ca, 24% de Mg y 8% de K como proporción de la suma Ca+Mg+K.

- K intercambiable

- P (Fósforo disponible): es necesario para el desarrollo de raíces, tronco, yemas jóvenes y para la floración.

- Brecha entre el Nitrógeno (N) de equilibrio y el N existente en el suelo. Es el menos importante de los macronutrientes para cacao porque se demostró científicamente que favorece el crecimiento vegetativo en detrimento del desarrollo del fruto; por lo tanto, solo se recomienda aplicar cuando el N se convierte en un factor limitante para el suelo, esto es, cuando se aleja del equilibrio $N/[(K+Ca+Mg)+6,15]/89$.

- Saturación de Bases: Se calculó con la ecuación de equilibrio $(K+Ca+Mg+Na)/\text{Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)}$. Esta es un indicador de la cantidad de nutrientes en el suelo e indica la cantidad de fertilizante que debe ser aplicado. En orden de importancia es la última de las variables consideradas.

La variable de entrada Cadmio (Cd) entra directamente en la última fase para calcular la variable Química porque este metal pesado es acumulativo, esto significa que es tóxico para seres vivos, como las plantas. Cuando los niveles en el suelo están por encima de 430 $\mu\text{g/kg}$ se produce una disminución de la fotosíntesis y de la absorción de nutrientes y agua, consecuentemente las plantas pueden presentar clorosis, inhibición de crecimiento, desecamiento de las puntas de las raíces y finalmente la muerte de la planta (Yadav, 2010).

Una vez seleccionadas y jerarquizadas las variables se definieron sus funciones de pertenencia con el fin de transformar los datos brutos en grados de satisfacción, el tipo de función, los parámetros y la referencia experta para diseñarlas se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 Tipo, forma, parámetros y fuentes para diseñar las funciones de pertenencia de las variables de entrada de la variable agregada Química

Variable de Entrada	Forma de la Función y Parámetros	Fuente
Cadmio (ppm)	 0; 0,43	(U.S. Environmental Protection Agency, 1996)
pH (H ₂ O)	 5; 5,5; 6,5; 7,5	(Rojas & Sacristán Sánchez, 2013)
Materia Orgánica (%)	 3; 5	(Rojas & Sacristán Sánchez, 2013)
Brecha del equilibrio de cationes Ca, Mg, K (%)	 0; 0,5	(Snoeck et al., 2016)
Potasio Intercambiable (me/100g)	 0,2; 0,6	(Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017; Rojas & Sacristán Sánchez, 2013; Snoeck et al., 2016)
Fósforo Disponible (ppm)	 5; 15	(Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017; Snoeck et al., 2016)
Brecha del Nitrogeno de equilibrio (N/Nequilibrio)	 0,5; 1; 1,5	(Snoeck et al., 2016)
Saturación de Bases (%)	 0,4; 0,6	(Snoeck et al., 2016)

Se calcularon las variables Macronutrientes, Balance Nutricional y Química siguiendo el orden de la Figura 16. Como Macronutrientes es una agregación de las variables Brecha del equilibrio de cationes, K, P, Balance de N y Saturación de Bases, con una granularidad de 2 (Bajo y Alto) para todas las variables involucradas y un operador FIS definido por el conocimiento experto se establecieron las $2^5=32$ conclusiones de regla como en la Tabla 7.

Tabla 7 Conclusiones de regla para calcular la variable agregada Macronutrientes

Brecha del equilibrio de cationes	K	P	Balance de N	Saturación de Bases	Macronutrientes
Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	0,1
Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	0,15
Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	0,2
Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	0,25
Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	0,35
Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	0,4
Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto	0,45
Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	0,4
Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	0,45
Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	0,5
Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo	0,55
Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	0,65
Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	0,7
Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	0,75
Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	0,4
Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	0,3
Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	0,4
Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	0,45
Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	0,5
Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	0,55
Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	0,65
Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto	0,7
Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	0,55
Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	0,6
Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	0,7
Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	0,75
Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	0,8
Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	0,85
Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	0,9
Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	1

La variable Macronutrientes se agregó con el pH y la Materia Orgánica para calcular Balance Nutricional, con un operador FIS y 8 reglas que están en la Tabla 8.

Tabla 8 Conclusiones de regla para calcular la variable agregada Balance Nutricional

pH	Materia Orgánica	Macronutrientes	Balance Nutricional
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,2
Bajo	Alto	Bajo	0,4
Bajo	Alto	Alto	0,5
Alto	Bajo	Bajo	0,4
Alto	Bajo	Alto	0,6
Alto	Alto	Bajo	0,7
Alto	Alto	Alto	1

Una vez calculada la variable Balance Nutricional se agregó ésta a la variable de entrada Cd para calcular la variable Química, se empleó un operador de agregación WAM y se asignaron los pesos de 0,7 para Balance nutricional y 0,3 para Cd.

El cálculo de la variable Física sigue la estructura jerárquica de la Figura 17.

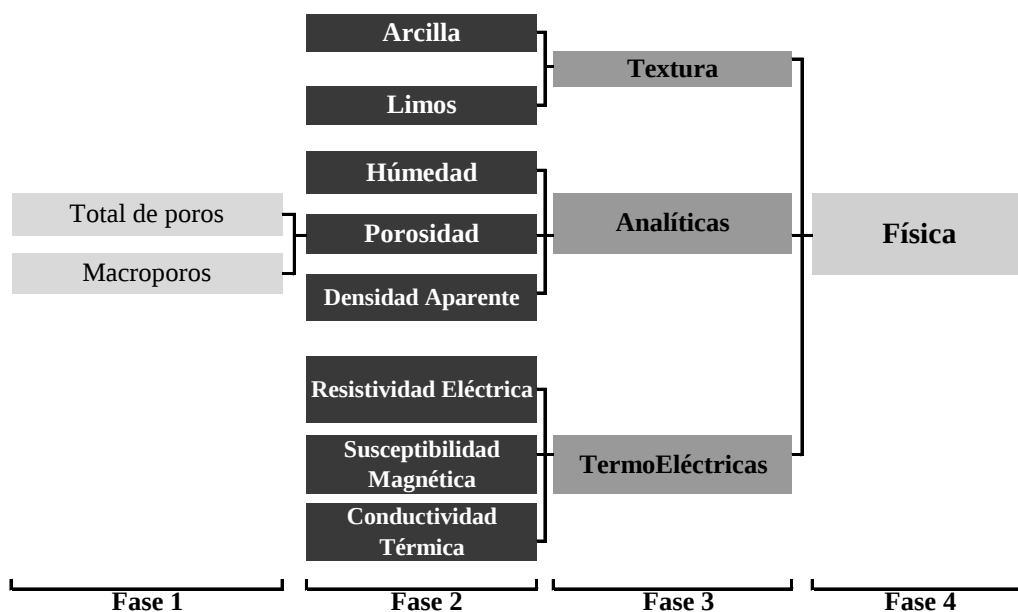


Figura 17 Estructura Jerárquica para Calcular la Variable Física

La variable más importante para calcular la variable Física es Textura porque esta determina la estructura del suelo e influencia como el agua y los nutrientes pueden ser absorbidos por el suelo; el equilibrio entre Arcillas, Limos y Arenas para cacao está definido en la literatura, la cantidad óptima de Arcillas es entre 30% y 40%, mientras que los Limos deben oscilar entre el 10% y el 20%. Ambos indicadores contribuyen para que los agrónomos comprendan el tipo de suelo y como este se relaciona con el pH y la CIC.

Cacao es exigente en la cantidad de agua, por tanto la variable Analíticas es la segunda más importante, pues Humedad, Porosidad y Densidad Aparente pueden ser modificadas con más facilidad que la textura aunque implica un alto costo, sin embargo un exceso o escasez de estas variables causa problemas en las raíces y el crecimiento de las plantas.

Finalmente, la variable TermoElectricas determina la energía productiva del suelo disponible para impulsar el rendimiento agronómico de los árboles, sin embargo esta tiene

un menor peso no porque sea menos importante sino porque generalmente las zonas geográficas donde se localiza el cultivo de cacao no presentan deficiencias al respecto.

Las funciones de pertenencia para transformar los datos brutos a grados de satisfacción para las variables de entrada que generan la variable Física están en la Tabla 9.

Tabla 9 Tipo, forma, parámetros y fuentes para diseñar las funciones de pertenencia de las variables de entrada de la variable agregada Física

Variable de Entrada	Forma de la Función y Parámetros	Fuente
Arcilla (%)	 15; 25; 35; 50	(Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017; Snoeck et al., 2016)
Limos (%)	 5; 15; 25; 35	(Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017; Snoeck et al., 2016)
Humedad (%)	 15; 20; 30; 55	(Larios González, 2014)
Total de Poros (%)	 10; 40; 50; 66	(Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017; Snoeck et al., 2016)
Macroporos (%)	 0,2; 0,33; 0,5	(Larios González, 2014)
Densidad Aparente (%)	 0,5; 1,2; 1,45; 1,8	(Larios González, 2014)
Resistividad Eléctrica (Ohm.m)	 60; 140	(Pinchao Piedrahita, 2013)
Susceptibilidad Magnética (CGS)	 100; 300	(Nutri-Tech Solutions, 2007)
Conductividad Térmica (Cal/cm.s.°C)	 0; 8,3; 10,6; 11,8	(Zuñiga Escobar, Orlando; Reyes Trujillo, 2007)

Agregando progresivamente las variables Textura, Electrotérmicas y Analíticas, se calculó la variable Física. En las Tabla 10-14 se presentan las conclusiones de reglas y el operador de agregación en cada caso.

Tabla 10 Generación de la variable Electrotérmica usando un operador FIS

Resistividad Eléctrica	Conductividad Térmica	Susceptibilidad Magnética	Electrotérmica
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,25
Bajo	Alto	Bajo	0,35
Bajo	Alto	Alto	0,6
Alto	Bajo	Bajo	0,4
Alto	Bajo	Alto	0,65
Alto	Alto	Bajo	0,75
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 11 Generación de la variable Textura usando un operador FIS

Arcilla	Limo	Textura
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,3
Alto	Bajo	0,5
Alto	Alto	1

Tabla 12 Generación de la variable Porosidad usando un operador FIS

Porosidad Total	Macroporosidad	Porosidad
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,3
Alto	Bajo	0,5
Alto	Alto	1

Tabla 13 Asignación de pesos para generar la variable Analítica con un operador WAM

Entrada	Humedad	Porosidad	Densidad aparente
Peso	0,5	0,3	0,2

Tabla 14 Generación de la variable Física usando un operador FIS

Textura	Analítica	Electrotérmica	Física
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,2
Bajo	Alto	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Alto	0,4
Alto	Bajo	Bajo	0,5
Alto	Bajo	Alto	0,7
Alto	Alto	Bajo	0,8
Alto	Alto	Alto	1

Una vez calculadas las variables Química y Física se calculó la variable Productividad del suelo usando un operador WAM y asignando un peso de 0,6 a la variable Química y de 0,4 a la variable Física. Se asignó mayor peso a Química porque son propiedades que en el corto y mediano plazo pueden cambiar conforme el manejo del cultivo, mientras que las propiedades físicas del suelo difícilmente puede modificarse en el corto o mediano plazo.

3.3.1.3. Comportamiento del Subsistema Cultivo.

El subsistema Cultivo corresponde a la agregación de las variables Árbol y Sistema (Ver Figura 18).

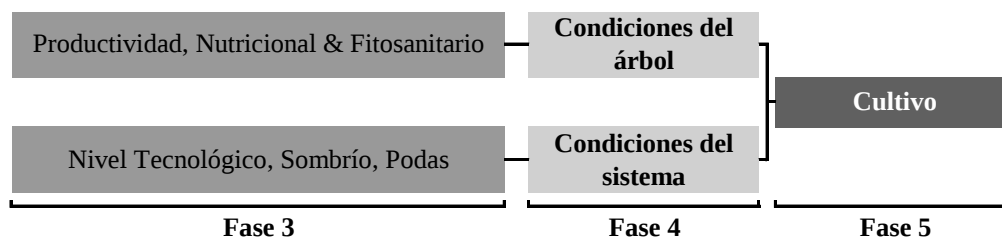


Figura 18 Estructura Jerárquica Subsistema Cultivo

Donde Árbol agrega las condiciones de la plantación de cacao a nivel específica del sitio de muestreo, esto es, el estado productivo, nutricional y fitosanitario de 20 árboles alrededor del punto de muestreo. Mientras que la variable Sistema obedece a las condiciones del cultivo de cacao como parte de un sistema de producción, es decir, nivel tecnológico, calidad de las podas y árboles asociados al cultivo.

Para calcular las variables Árbol y Sistema fueron diseñadas las funciones de pertenencia con forma Semi trapezoidal superior con valores Kernel inferior igual a 1 y Soporte inferior igual a 0, esto debido a que los datos brutos fueron medidos en una escala entre 0 y 1. Lo anterior aplica para todas las variables de entrada excepto la producción anual por árbol que fue definida a partir de (Abbott et al., 2018).

La variable de entrada Nutricional entra directamente a ser computada con Productividad y Fitosanidad para calcular la variable Árbol. Similarmente ocurre con la variable Sombrío que se computa con Tecnología y Podas para calcular la variable Sistema.

Después se establecieron las conclusiones a las reglas como muestran las Tabla 15-20.

Tabla 15 Generación de la variable productividad usando un operador FIS

Estado Productivo	Producción anual/árbol	Productividad
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,4
Alto	Bajo	0,7
Alto	Alto	1

Tabla 16 Generación de la variable Fitosanidad usando un operador FIS

Estado Fitosanitario	Peor plaga observada	Nivel daño de la peor plaga	Maleza	Fitosanidad
Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Bajo	Alto	0,1
Bajo	Bajo	Alto	Bajo	0,2
Bajo	Bajo	Alto	Alto	0,3
Bajo	Alto	Bajo	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Bajo	Alto	0,4

Bajo	Alto	Alto	Bajo	0,5
Bajo	Alto	Alto	Alto	0,6
Alto	Bajo	Bajo	Bajo	0,4
Alto	Bajo	Bajo	Alto	0,5
Alto	Bajo	Alto	Bajo	0,6
Alto	Bajo	Alto	Alto	0,7
Alto	Alto	Bajo	Bajo	0,7
Alto	Alto	Bajo	Alto	0,8
Alto	Alto	Alto	Bajo	0,9
Alto	Alto	Alto	Alto	1

Tabla 17 Asignación de pesos para generar la variable Árbol con un operador WAM

Entrada	Productividad	Nutricional	Fitosanidad
Peso	0,4	0,3	0,3

Tabla 18 Generación de la variable Tecnología usando un operador FIS

Nivel Tecnológico	Fertilización	Tecnología
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,3
Alto	Bajo	0,7
Alto	Alto	1

Tabla 19 Generación de la variable Podas usando un operador FIS

Altura de los árboles	Calidad de las podas	Podas
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,3
Alto	Bajo	0,6
Alto	Alto	1

Tabla 20 Generación de la variable Sistema usando un operador FIS

Tecnología	Podas	Sombrío	Sistema
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,2
Bajo	Alto	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Alto	0,5
Alto	Bajo	Bajo	0,5
Alto	Bajo	Alto	0,7
Alto	Alto	Bajo	0,8
Alto	Alto	Alto	1

Para generar la variable Cultivo se empleó un operador WAM y una asignación de pesos de 0,65 a la variable Árbol y 0,35 a la variable Sistema.

Finalmente, las variables Productividad del Suelo y Cultivo se computaron como muestra la Tabla 21 para calcular el índice del subsistema Suelo-Cultivo usando un operador FIS y siguiendo la estructura jerárquica que se presentó en la Figura 7.

Tabla 21 Generación del Índice del subsistema Suelo-Cultivo usando un operador FIS

Productividad del suelo	Cultivo	Subsistema Suelo-Cultivo
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,4
Alto	Bajo	0,6
Alto	Alto	1

3.3.1.4. Calibración del Modelo de Subsistema Suelo-Cultivo.

Una vez diseñado el sistema de inferencia para el subsistema Suelo-Cultivo en GeoFis el mismo fue calibrado con los datos correspondientes a las 10 fincas localizadas en Chaparral. En la Tabla 22 se presentan los resultados del Índice del subsistema Suelo-Cultivo con los datos de calibración.

Tabla 22 Índice del subsistema Suelo-Cultivo con los datos de calibración (Chaparral)

Finca	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Índice Suelo-Cultivo	0,490	0,495	0,475	0,407	0,549	0,577	0,527	0,494	0,426	0,566

Nota: Las fincas denotadas con “C” se refiere a las localizadas en Chaparral, Tolima

Las fincas con el valor más alto en el índice Suelo-Cultivo fueron C6 y C10, respectivamente, ambas con valores superiores a 0,55, es decir Medio Alto, lo que significa que hay un relativo equilibrio entre las condiciones del suelo y el manejo del cultivo. Mientras que C4 y C9 obtuvieron las puntuaciones más bajas de la zona y correspondiendo a la categoría de un índice Medio Bajo.

Los resultados del Índice del subsistema Suelo-cultivo en Chaparral oscilaron entre 0,407 y 0,577, esto es, entre Medio Bajo y Medio Alto, con poca dispersión entre fincas, es decir que todas son relativamente aptas para cacao, sin embargo, para identificar los factores más limitantes/potenciales en cada finca, a nivel de suelo y de cultivo, los resultados intermedios deben ser analizados.

3.3.1.5. Validación del Modelo de Subsistema Suelo-Cultivo.

Los datos de las fincas de Mariquita y Ortega fueron procesados con el sistema de inferencia que fue calibrado con las fincas de Chaparral. Los resultados se presentan en la Tabla 23 y Tabla 24, respectivamente.

Tabla 23 Resultados índice del Subsistema Suelo-Cultivo de las fincas de Mariquita

Finca	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Índice Suelo-Cultivo	0,522	0,498	0,496	0,525	0,461	0,469	0,48	0,516	0,54	0,603

Nota: Las fincas denotadas con “M” se refiere a las localizadas en Mariquita, Tolima

Las plantaciones de cacao de Mariquita son recientes (entre 6 y 16 años), por lo que los agricultores no tienen mucha experiencia y aún están aprendiendo a administrar sus fincas. Además, como los agricultores jóvenes carecen de conocimientos intergeneracionales, necesitan los consejos de los servicios de extensión. Por tanto, los materiales vegetales predominantes son los clones y siguen los paquetes tecnológicos establecidos por las instituciones que trabajan en el sector del cacao en el municipio.

No obstante, la variable Física del suelo en Mariquita refleja fuertes restricciones para el cultivo de Cacao, como las mismas difícilmente pueden ser alteradas en el corto y mediano plazo esto implica una condición desfavorable para aumentar la productividad en la zona. Esto probablemente explica porque este cultivo es relativamente nuevo en la zona, a diferencia de Chaparral donde históricamente el mismo ha estado presente.

Pese a que las propiedades físicas del suelo juegan en contra del sistema de producción de cacao en Mariquita, vale la pena señalar que la mayor disciplina de los productores en esta zona, respecto a las labores requeridas por el cultivo como la fertilización y manejo fitosanitario favorece el desempeño de las fincas a nivel del cultivo y la Química de suelos.

En la Tabla 24 se presentan los resultados de las fincas de Ortega, zona donde las prácticas culturales para el cultivo de cacao están estrechamente relacionadas con las que tradicionalmente se realizan en Chaparral pero donde los cultivos son relativamente jóvenes, por lo que el material vegetal corresponde principalmente a clones que han demostrado mayor productividad bajo condiciones de manejo específico y que no obedecen a las efectuadas por los productores de esta zona, explicando los resultados que en general están por debajo, o muy cerca, de 0,5.

De manera que Ortega puede considerarse como una mezcla entre el tipo de manejo de Mariquita y Chaparral, quizás la cercanía a Chaparral hace que se adopten las prácticas culturales similares, esto es, tradicionales, no obstante, el material vegetal predominante son los clones, como consecuencia de los programas de fomento liderados por instituciones como Fedecacao, Agrosavia, secretarías de desarrollo rural, PNUD (Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo) y KOIKA (Agencia de Cooperación Internacional de Korea), entre otras.

Tabla 24 Resultados índice del Subsistema Suelo-Cultivo de las fincas de Ortega

Finca	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10
Índice Suelo-Cultivo	0,493	0,513	0,475	0,517	0,495	0,475	0,557	0,475	0,505	0,431

Nota: Las fincas denotadas con “O” se refiere a las localizadas en Ortega, Tolima

En general, los valores del índice Suelo-Cultivo para las fincas de Mariquita fueron mayores que los de las fincas de Ortega y Chaparral, este comportamiento se debe a un mejor desempeño de la variable Cultivo, lo que está conforme a la realidad ya que en Mariquita los cultivos son más modernos y con visión comercial, esto implica la realización de labores en el cultivo que implican mayor inversión de tiempo y de dinero.

3.3.2. Resultados del Subsistema Socioeconómico

La producción agropecuaria, como actividad humana y económica, involucra la interacción de diversidad de elementos según el contexto en que se desarrolla, de los cuales algunos no se pueden observar ni medir directamente, sin embargo, para fines prácticos y con el propósito de ofrecer una magnitud que permita hacer comparaciones de dichas condiciones entre los diferentes sistemas de producción de cacao, en esta investigación se propusieron tres variables instrumentales (Social, Económico, Gestión y administración) para aproximarse a la realidad socioeconómica de las fincas analizadas.

Para la definición de las variables y su respectivo indicador de referencia se tomó como base el marco metodológico diseñado por La Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA) para la evaluación de impacto ambiental de una actividad

agropecuaria determinada- APOIA Novo-Rural-, específicamente se adaptaron las variables e indicadores de tres dimensiones, Sociocultural, Económico y de Gestión/administración.

A continuación se presenta la descripción del funcionamiento de cada subsistema empleado para generar la variable agregada Socioeconómico, la jerarquización de variables de entrada, las funciones de pertenencia, operadores de agregación y el conjunto de bases de reglas de decisión. Posteriormente se presentan los cálculos de la variable Socioeconómico, usando los datos de Chaparral para calibrar el modelo y los datos de Ortega y Mariquita para la validación del mismo.

3.3.2.1. Comportamiento del Subsistema Social.

Tomando como referencia la dimensión “Valores Socioculturales” del marco APOIA- Novo Rural y adaptándola al contexto nacional, se determinaron los indicadores de referencia para calcular la variable Social, estos son: Servicios Básicos, Salud y Escolaridad (Ver Figura 19).

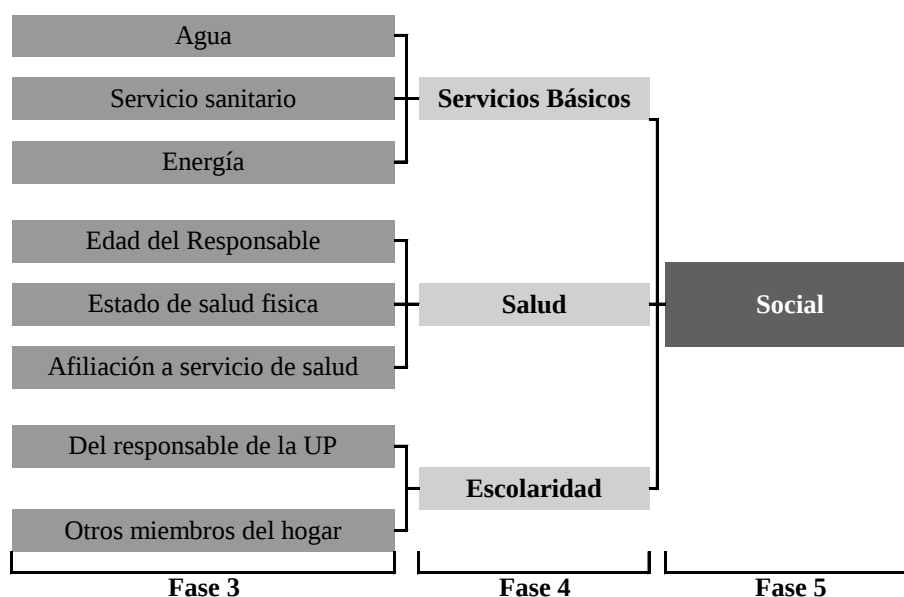


Figura 19 Estructura jerárquica del subsistema Social

En el componente de Servicios Básicos se priorizaron los tres más esenciales conforme los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6. Agua Limpia y Saneamiento y 7. Energía Asequible y No Contaminante.

En el caso de la variable Agua se considera el acceso a agua potable y salubre, en Saneamiento si cuenta con batería sanitaria para defecar. Dado que ambos son concebidos como servicios elementales y contar con ellos es un derecho humano (ONU, 2015) esto explica su mayor jerarquía para calcular la variable Servicios Básicos.

Debido al carácter vital del agua para la supervivencia del ser humano se consideró esta variable de entrada como la de mayor importancia, no obstante además del acceso a esta importa la fuente de donde proviene porque más de la mayor parte de las aguas residuales resultantes de la actividad humana se vierten en los ríos o en el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación, conteniendo incluso restos fecales. Luego, la función de pertenencia definida para esta variable corresponde a una semi-trapezoidal superior que toma valores conforme el origen del agua (Ver Tabla 25).

Asimismo, la batería sanitaria con que cuentan las comunidades para llevar a cabo la defecación incide en sus condiciones de higiene y saneamiento, que de ser inadecuadas puede provocar enfermedades diarreicas y llevar hasta la muerte. La función de pertenencia definida para esta variable corresponde a una semi-trapezoidal inferior que toma valores según el tipo de batería sanitaria (Ver Tabla 25).

Por otro lado, los servicios energéticos son esenciales para el desarrollo de casi todas las actividades de la vida cotidiana, el uso de energía es indispensable para el desarrollo económico y humano. Por lo tanto la variable Energía corresponde a la agregación de las variables de entrada Electricidad y Fuente de energía para cocinar.

Por un lado, el acceso a energía eléctrica, de manera generalizada y equitativa, a nivel mundial es una prioridad porque de esta depende el acceso al agua potable, el funcionamiento de equipos médicos y la competitividad económica de las empresas. Por otro lado, el ODS 7 también se propone el acceso a combustibles de cocina limpios y seguros, ya que el uso de biomasa para cocinar contamina el aire y por tanto afecta la salud humana, mayormente de las mujeres por ser sobre quienes recae culturalmente el desarrollo de las labores domésticas.

Tabla 25 Funciones de pertenencia de las variables de entrada de la variable Social

Variable de Entrada	Categorización de alternativas	Forma de la Función y Parámetros
Agua	Captación propia (nacideros, ríos, manantiales, subterránea): 1	 1 ; 3

	Acueducto comunitario: 2 Acueducto del municipio: 3	
Servicio Sanitario	Inodoro conectado a alcantarillado: 1 Inodoro conectado a pozo séptico: 2 Inodoro sin conexión: 3 Letrina: 4 Bajamar: 5 No tiene servicio sanitario: 6	 2 ; 4
Electricidad	Sí: 1 No: 2	 1 ; 2
Fuente de energía para cocinar	Electricidad: 1 Petróleo, gasolina, kerosene, alcohol: 2 Gas natural conectado a red pública: 3 Gas propano en cilindro o pipeta: 4 Leña, madera o carbón de leña: 5 Carbón mineral: 6	 1 ; 3 ; 5
Edad del Responsable	Joven: 18-26 Años Adulto :27-55 Años Adulto Mayor: 55-60 Años Viejo: 60-100 Años	 18 ; 26; 55 ; 60
Estado de Salud Física	Malo: 0-39 Aceptable: 40-69 Bueno: 70-100	 40 ; 70
Afiliación a sistema de salud	Régimen Contributivo: 1 Régimen Subsidiado: 2 Ninguno: 3	 1 ; 3
Escolaridad del responsable de la UP	Ninguno y no sabe leer y escribir : 1 Ninguno pero sabe leer y escribir : 2 Preescolar: 3	 2 ; 5
Escolaridad de otros miembros del hogar	Primaria: 4 Bachillerato: 5 Superior o universitaria: 6	

Una vez establecidas las funciones de pertenencia de cada variable de entrada y la importancia jerárquica de cada una dentro de una agregación determinada, se definió la base de reglas empleando un operador de agregación tipo FIS para las variables agregadas Servicios Básicos (Tabla 26) y Salud (Tabla 27). Para calcular la variable Escolaridad se utilizó un operador de agregación tipo WAM con una asignación de pesos de 0,66 para la escolaridad del responsable de la UP y 0,34 para la de los demás miembros del hogar.

Tabla 26 Conclusiones de reglas para calcular la variable Servicios Básicos

Agua	Sanitario	Energía	Servicios Básicos
Bajo	Bajo	Bajo	0

Bajo	Bajo	Alto	0,2
Bajo	Alto	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Alto	0,4
Alto	Bajo	Bajo	0,45
Alto	Bajo	Alto	0,7
Alto	Alto	Bajo	0,8
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 27 Conclusiones de reglas para calcular la variable Salud

Edad	SaludFísica	Afiliación SSS	Salud
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,25
Bajo	Alto	Bajo	0,25
Bajo	Alto	Alto	0,6
Alto	Bajo	Bajo	0,5
Alto	Bajo	Alto	0,65
Alto	Alto	Bajo	0,85
Alto	Alto	Alto	1

Finalmente, para calcular la variable Social se usó un operador WAM con los siguientes pesos: 0,33 Servicios Básicos, 0,34 Salud y 0,33 Educación.

3.3.2.2. Comportamiento del Subsistema Económico.

La variable Económico corresponde a la agregación de las variables Financiero, Empleo y Comercialización (Ver Figura 20).

Los indicadores de referencia para Financiero toman como referencia la dimensión “Valores Económicos” del marco APOIA, conforme el contexto local y las limitaciones de información fiable, estos son: Ingresos, Diversidad de las fuentes de ingresos y Vivienda.

En el caso de la variable Ingresos se consideró la capacidad del cultivo de cacao para generar renta tomando como referencia el valor monetario de un salario mínimo mensual legal vigente (SMMLV) en Colombia para el 2019, esto es, COP \$ 925.148.

Respecto a la Diversidad de fuentes de ingresos se consideró de donde proviene la renta familiar, entre menos fuentes mayor dependencia de las fuentes disponibles, y por tanto, mayor vulnerabilidad a choques externos. Finalmente, en Vivienda se consideró el material predominante de las paredes exteriores de la vivienda.

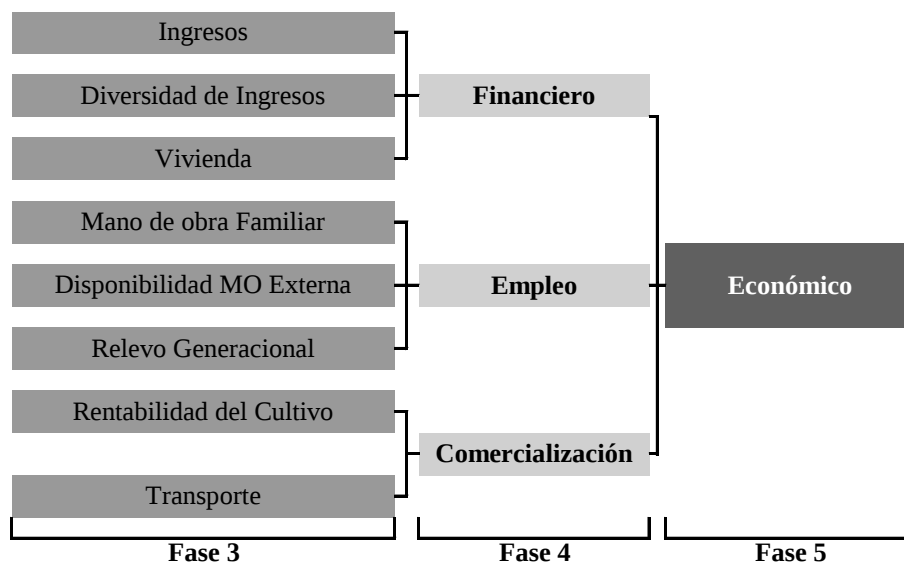


Figura 20 Estructura jerárquica del subsistema Económico

Para el caso de la variable Empleo vale la pena aclarar que dentro del marco APOIA está concebido en los “Valores socioculturales”, sin embargo, para efectos de esta investigación dicha variable se consideró dentro del componente Económico por su estrecha relación con los ingresos ya que el cultivo de cacao es intensivo en el uso de mano de obra, y tradicionalmente usa Mano de Obra Familiar (MOF) que evita el desembolso en efectivo por dicho concepto, también se consideran aquí la Disponibilidad de Mano de Obra Externa (MOE) y el Relevo Generacional en la zona.

Por el lado de MOF se consideró la cantidad de personas del hogar que trabajan en la finca como proporción de las que podrían hacerlo, mientras que las variables Disponibilidad de MOE en la zona y el Relevo Generacional corresponden a la percepción del encargado de la unidad productiva (quien respondió la entrevista).

En el caso de la variable Comercialización, en APOIA está dentro de la dimensión “Gestión y Administración” pero por el interés particular del cacao como actividad económica, dicha variable fue incluida dentro del componente Económico. Las dos variables agregadas que se integran para dar origen a Comercialización son Rentabilidad del cacao y Transporte, en la primera se tuvieron en cuenta el Precio, Valor Agregado y Rentabilidad como variables de entrada, y en la segunda se consideraron el Tiempo, Costo, Condiciones de la vía y Tenencia y Tipo de Transporte.

La variable Precio corresponde a la relación entre el Precio de venta y el Precio al que los productores consideran que no tienen pérdidas ni ganancias, este es el precio de equilibrio, si dicha proporción es igual a 1 significa que ambos precios son iguales, pero si es < 1 el precio de venta está por debajo del de equilibrio y viceversa.

La variable Valor Agregado corresponde a la valoración del agrónomo durante la visita de campo en cada finca respecto a las características del cacao que se vende en cada UP, teniendo en cuenta que puede ser vendido en grano seco, transformado artesanalmente (principalmente para chocolate de mesa) o a nivel industrial (Para confitería).

La Rentabilidad del productor es la percepción que cada productor tiene respecto a su cultivo de cacao.

En el caso de las variables relacionadas con el transporte se supuso:

1°. Entre menos tiempo tome llegar al mercado mejor, lo ideal es una duración máxima de 30 minutos, aceptable hasta 60 minutos, y superior a ese tiempo se consideró excesivo.

2°. Para el costo de transporte (ida y vuelta) se tomó como referencia que el auxilio de transporte del SMMLV debe representar máximo el 10% del salario. En promedio en las zonas de estudio, el costo del jornal es de COP \$30.000.

3°. Las condiciones de la vía contemplan el material predominante entre la finca y mercado, pudiendo ser en Travesía, esto es, camino a través de la montaña donde solo es posible acceder caminando o en vehículo de tracción animal; Trocha que corresponde al camino demarcado pero no asfaltado por el que es posible entrar con dificultad usando vehículo automotor; y Pavimento que es la carretera asfaltada. Para llegar a algunas fincas se requiere transitar por una combinación de dos o más tipos de estas vías, luego a mayor cantidad de tipos de vías mayor riesgo de un contratiempo (accidente o cierre).

4°. En la tenencia y tipo de transporte se considera si el vehículo es propio o alquilado y la cantidad de medios de transporte que deben ser empleados, pudiendo ser de tracción animal, automotor o ambos. Entre mayor cantidad de medios sean requeridos y alquilados, mayor dependencia de medios de transporte externos, lo que implica asumir más costos.

En la Tabla 28 se presentan las funciones de pertenencia de todas las variables de entrada que se tuvieron en cuenta para calcular la variable agregada Económico, conforme la categorización efectuada a las alternativas de respuesta de la Encuesta y la Entrevista estructurada empleada para el levantamiento de información socioeconómica.

Tabla 28 Funciones de pertenencia de las variables de entrada de la variable Económico

Variable de Entrada	Categorización de alternativas	Forma de la Función y Parámetros
Ingresos por Cacao	Muy Bajo: < 0,5 SMMLV Bajo: 0,5 SMMLV- 0,75 SMMLV Medio: 0,76 - 1 SMMLV Alto: 1- 1,5 SMMLV Alto: > 1,5 SMMLV	 462.574 ; 925.148
Capacidad de los ingresos cubrir gastos	No alcanzan para cubrir los gastos: 1 Alcanzan para cubrir los gastos mínimos: 2 Cubren más que los gastos mínimos: 3	 1 ; 3
Diversidad de fuentes de ingresos	Una Fuente: 1 Dos Fuentes: 2 Tres Fuentes: 3 Más de Tres Fuentes: 4	 1 ; 3
Material predominante de la Vivienda	Ladrillo, bloque, material prefabricado, piedra:1 Madera: 2 Adobe o tapia pisada: 3 Bahareque: 4 Carpa: 5	 1 ; 5
Mano de Obra Familiar (MOF)	Baja: 0 - 0,39 Media: 0,40- 0,69 Alta: 0,7 – 1	 0,4 ; 0,7
Mano de Obra Externa (MOE)	Baja: 0 - 0,39 Media: 0,40- 0,69 Alta: 0,7 – 1	 0,4 ; 0,7
Relevo Generacional	Baja: 0 - 0,39 Media: 0,40- 0,69 Alta: 0,7 – 1	 0,4 ; 0,7
Precio	Bajo: < 1 Medio: 1 Alto: >1	 0 ; 1
Valor Agregado	Baja: 0 - 0,39 Media: 0,40- 0,69 Alta: 0,7 – 1	 0,4 ; 0,7
Rentabilidad	Baja: 0 - 0,39 Media: 0,40- 0,69 Alta: 0,7 – 1	 0,4 ; 0,7
Tiempo al Mercado	Adecuado: < 0,5 horas (30 min) Regular: 0,51-1 horas (31-60 min) Excesivo: > 1 hora (60 min)	 0,5 ; 1
Costo de Transporte	Bajo: < \$3000 Aceptable: \$3000-\$6000 Alto: > \$6000	 3000 ; 6000
Condiciones de la vía	Travesía, Trocha , Pavimento: 1 Trocha y Pavimento: 2 Pavimento: 3	 1 ; 3
Tenencia y tipo de Transporte	Tracción animal + Autoalquilado:1 Automotor Alquilado: 2 Automotor Propio: 3	 1 ; 3

Posteriormente se definió la base de reglas, usando un operador de agregación FIS, para calcular las variables Transporte (Tabla 29), Financiero (Tabla 30) y Empleo (Tabla 31).

Tabla 29 Conclusiones de reglas para calcular la variable Transporte

Tiempo Transporte	Costo Transporte	Tipo de Vía	Tipo Transporte	Transporte
Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Bajo	Alto	0,1
Bajo	Bajo	Alto	Bajo	0,5
Bajo	Bajo	Alto	Alto	0,6
Bajo	Alto	Bajo	Bajo	0,25
Bajo	Alto	Bajo	Alto	0,35
Bajo	Alto	Alto	Bajo	0,8
Bajo	Alto	Alto	Alto	0,85
Alto	Bajo	Bajo	Bajo	0,15
Alto	Bajo	Bajo	Alto	0,2
Alto	Bajo	Alto	Bajo	0,65
Alto	Bajo	Alto	Alto	0,75
Alto	Alto	Bajo	Bajo	0,4
Alto	Alto	Bajo	Alto	0,45
Alto	Alto	Alto	Bajo	0,9
Alto	Alto	Alto	Alto	1

Tabla 30 Conclusiones de reglas para calcular la variable Financiero

Cantidad de Ingresos	Fuentes de Ingresos	Vivienda	Financiero
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,2
Bajo	Alto	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Alto	0,5
Alto	Bajo	Bajo	0,5
Alto	Bajo	Alto	0,7
Alto	Alto	Bajo	0,85
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 31 Conclusiones de reglas para calcular la variable Empleo

Mano de obra Familiar	Mano de Obra Externa	Relevo Generacional	Empleo
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,3
Bajo	Alto	Bajo	0,4
Bajo	Alto	Alto	0,7
Alto	Bajo	Bajo	0,5
Alto	Bajo	Alto	0,8
Alto	Alto	Bajo	0,6
Alto	Alto	Alto	1

Usando un operador de agregación tipo WAM y con su respectiva asignación de pesos se calcularon las siguientes variables:

- Rentabilidad del cultivo de cacao: 0,4 para Precio, 0,3 para Valor Agregado y 0,3 para Percepción de Rentabilidad.
- Comercialización: 0,65 para Rentabilidad y 0,35 para Transporte.

- Económico: 0,34 para Financiero, 0,33 para Comercialización y 0,33 para Empleo.

3.3.2.3. Comportamiento del Subsistema Gestión y Administración.

La perdurabilidad de un sistema de producción en el tiempo y en el espacio geográfico está asociado en gran medida a las decisiones que se toman dentro la UP respecto a cómo organizarse para desarrollar procesos y cómo enfrentar los cambios externos (ambientales, sociales, económicos o políticos), por lo tanto, dentro del factor socioeconómico se incluyó la variable agregada Gestión y Administración, que integra las variables Perfil del Responsable de la UP, Gestión Ambiental y Relacionamento Institucional (Ver Figura 21).

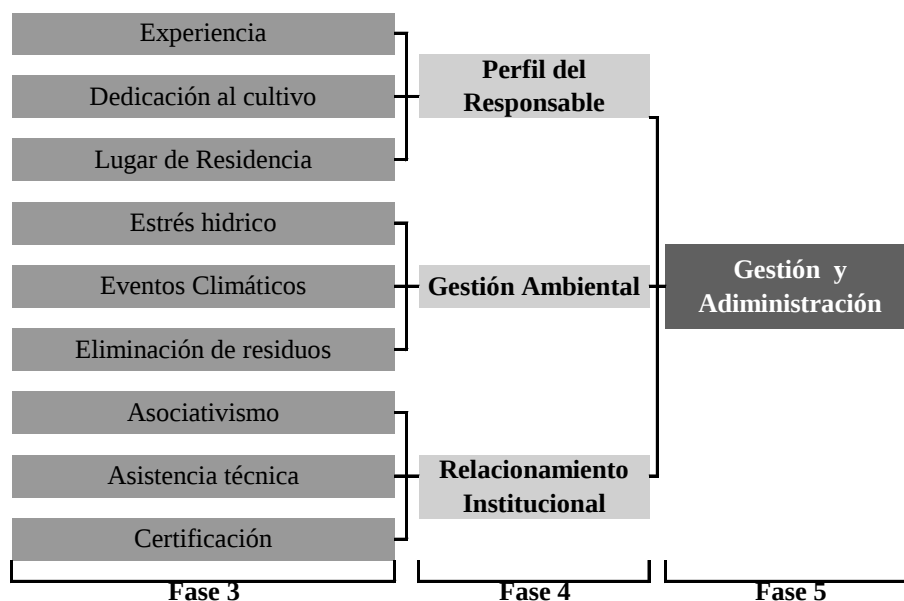


Figura 21 Estructura jerárquica del subsistema Gestión y Administración

El propósito de la variable Perfil del Responsable de la UP es medir cómo quien toma las decisiones respecto al sistema de producción se vincula al esquema de gestión de la UP. En este caso se consideraron los años de Experiencia del encargado de la UP produciendo cacao, la Dedicación de tiempo realizando labores del cultivo y capacitándose en el sistema de producción, y su lugar de Residencia.

El objetivo de la variable de Gestión Ambiental es valorar: 1. Estrés Hídrico: referido específicamente a la gestión del agua para uso del cultivo. 2. Eventos Climáticos: concierne a la ocurrencia en los últimos dos años de un fenómeno asociado al cambio del clima y que

ha afectado negativamente la UP o la finca. Y 3. Eliminación de Residuos: se enfoca en conocer la alternativa dominante en la finca para deshacerse de los residuos sólidos.

Finalmente, se consideró el Relacionamento Institucional como una variable proxy para medir las relaciones de confianza, reciprocidad y cooperación entre el productor y otros individuos con los que conforma redes interpersonales que dan origen a una institucionalidad sociocultural (Durstun, 2000).

Siguiendo (Stachetti-Rodrigues & Bruno, 2007) se consideraron como variables de entrada:

Asociativismo: Representa la capacidad del productor para trabajar articuladamente con pares en pro de mejorar el desempeño de su sistema productivo. Teniendo en cuenta que todos los productores encuestados pertenecen a alguna asociación se distinguió entre quienes participan, quienes no lo hacen y quienes no confían en el trabajo de la asociación.

Asistencia Técnica: se refiere al acompañamiento por parte de personal experto en el cultivo de cacao con el fin de aumentar la productividad del mismo, aquí puntualmente se valoró si cuenta con este tipo servicio o no.

Y, finalmente, **Certificación** ya que esto da cuenta de un tipo de relación con externos que garantiza el cumplimiento de unas normas determinadas que representan una mejor calidad de la producción o del producto.

Teniendo en cuenta lo anterior y categorizando las alternativas de respuesta de la encuesta y la entrevista socioeconómica, se establecieron los parámetros para definir las funciones de pertenencia de cada variable de entrada empleada para generar la variable agregada Gestión y Administración conforme los indicadores de referencia. Esta información se presenta de manera resumida en la Tabla 32.

Después de definir las funciones de pertenencia de las variables de entrada, se generó la base de reglas. Se usó un operador WAM para agregar Dedicación de tiempo al cultivo y Capacitación en el sistema con un peso de 0,5 para cada variable. Mientras que se usó un operador FIS para agregar Experiencia, Dedicación y Residencia en la variable Perfil del Responsable (Tabla 33); asimismo se integraron Estrés Hídrico, Eventos Climáticos y Eliminación de Residuos en Gestión Ambiental (Tabla 34); finalmente se calculó Relacionamento Institucional (Tabla 35) a partir de Asociativismo, Asistencia Técnica y Certificación.

Tabla 32 Funciones de pertenencia de las variables de entrada para calcular la variable Gestión y Administración

Variable de Entrada	Categorización de alternativas	Forma de la Función y Parámetros	
Experiencia	Limitada: Hasta 5 años Aceptable: 5,1 a 15 años Suficiente: Más de 15 años		5 ; 15
Dedicación de tiempo al cultivo	Baja: 0 - 0,39 Media: 0,40- 0,69 Alta: 0,7 - 1		0,4 ; 0,7
Capacitación	Baja: 0 - 0,39 Media: 0,40- 0,69 Alta: 0,7 - 1		0,4 ; 0,7
Estrés hídrico	Sí: 1 No:2		1 ; 2
Eventos climáticos	Baja:1 Media: 2 Alta: 3 o más		1 ; 3
Eliminación de residuos	Por recolección pública o privada: 1 La tiran a un patio, lote, zanja o baldío: 2 La tiran a un río, quebrada, caño o laguna: 3 La queman o entierran: 4		1 ; 3
Asociativismo	Sí y participa: 1 Sí pero no participa: 2 Sí pero no confía en la asociación: 3		1 ; 3
Asistencia técnica	Baja: 0 - 0,39 Media: 0,40- 0,69 Alta: 0,7 - 1		0,4 ; 0,7
Certificación	Sí: 2 No:1		1 ; 2

Tabla 33 Conclusiones de reglas para calcular la variable Perfil del Responsable

Experiencia	Dedicación	Residencia	Perfil del Responsable
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,2
Bajo	Alto	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Alto	0,4
Alto	Bajo	Bajo	0,5
Alto	Bajo	Alto	0,7
Alto	Alto	Bajo	0,8
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 34 Conclusiones de reglas para calcular la variable Gestión Ambiental

Estrés Hídrico	Eventos Climáticos	Eliminación de Residuos	Gestión Ambiental
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,25
Bajo	Alto	Bajo	0,4
Bajo	Alto	Alto	0,65

Alto	Bajo	Bajo	0,35
Alto	Bajo	Alto	0,5
Alto	Alto	Bajo	0,75
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 35 Conclusiones de reglas para calcular la variable Relacionamento Institucional

Asociativismo	Asistencia Técnica	Certificación	Relacionamento Institucional
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,1
Bajo	Alto	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Alto	0,35
Alto	Bajo	Bajo	0,6
Alto	Bajo	Alto	0,7
Alto	Alto	Bajo	0,9
Alto	Alto	Alto	1

Finalmente se calculó la variable Gestión y Administración agregando: Perfil del Responsable, Relacionamento Institucional y Gestión Ambiental con un operador tipo WAM y unos pesos de 0,34, 0,33 y 0,33 respectivamente.

Luego las variables Social, Económico y Gestión y Administración se agregaron con un WAM y los pesos respectivos de 0,34, 0,33 y 0,33, generando el indicador socioeconómico.

3.3.2.4. Calibración del Modelo de Subsistema Socioeconómico.

Después de definir las variables de entrada y agregadas, así como su importancia jerárquica y pesos, se usaron los datos de las fincas de Chaparral para calibrar el modelo propuesto con el fin de calcular el indicador del subsistema Socioeconómico. Los resultados por Finca se presentan en la Tabla 36.

Vale la pena aclarar que para el caso de la Finca C1 no se tiene la información completa para calcular el indicador de este factor porque no fue posible aplicar la Encuesta Socioeconómica, luego se presentan los resultados para el resto de las fincas de esa zona.

Tabla 36 Resultados índice del Subsistema Socioeconómico de las fincas de Chaparral

Finca	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Índice Socioeconómico	0,407	0,553	0,404	0,480	0,481	0,521	0,489	0,347	0,532

En términos generales se obtuvo que el indicador socioeconómico en las fincas C3, C5, C6, C7, C8 y C10 fue Medio, mientras que en las fincas C2, C4 y C9 fue Medio Bajo.

Con un índice socioeconómico promedio de 0,468 y una desviación de 0,068 en la zona. La finca con mejor puntuación en este componente fue C3 mientras que C9 presentó la puntuación más baja de las 9 analizadas para Chaparral.

3.3.2.5. Validación del Modelo de Subsistema Socioeconómico.

Empleando los datos de Mariquita y Ortega se hizo la validación del modelo. Los resultados se presentan en las Tabla 37 y Tabla 38, respectivamente.

Dado que en las visitas a campo en Mariquita se encontraron viviendas mejor equipadas, productores y familias más jóvenes, escuelas más cercanas a las fincas, productores con registros de producción, y con fuertes lazos instituciones, se esperaba que el indicador socioeconómico fuera superior en ese municipio que en Chaparral u Ortega. Se resalta que ninguna de las fincas tuvo un índice socioeconómico Bajo o Muy Bajo.

Debido a que no fue posible completar la información requerida para calcular el indicador socioeconómico final en las fincas M3, M5 y M10, estas se excluyen para efectos de presentar los resultados de la zona.

Tres de las siete fincas tuvieron un índice socioeconómico Medio Alto (M1, M7 y M9), dos Medio (M2 y M6) y dos Medio Bajo (M4 y M8). La finca con mayor puntuación en el Factor socioeconómico fue M7, mientras que M8 presentó el puntaje más bajo. En promedio en la zona el índice socioeconómico fue de 0,551 con una desviación de 0,106.

Tabla 37 Resultados índice del Subsistema Socioeconómico de las fincas de Mariquita

Finca	M1	M2	M4	M6	M7	M8	M9
Índice Socioeconómico	0,636	0,499	0,437	0,518	0,707	0,433	0,626

En Ortega una de las diez fincas tuvo un índice socioeconómico Medio Alto (O9), cuatro Medio (O1, O3, O4 y O5) y cinco Medio Bajo (O2, O6, O7, O8 y O10). Con un índice promedio de 0,479 y una desviación de 0,091.

Tabla 38 Resultados índice del Subsistema Socioeconómico de las fincas de Ortega

Finca	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10
Índice Socioeconómico	0,482	0,472	0,501	0,550	0,532	0,400	0,347	0,377	0,659	0,469

3.3.3. Resultados del Subsistema de Calidad de Cacao

Se presume que para que aromas específicos y sabores básicos positivos sean percibidos en el licor del cacao éste deberá ser el resultado de buenas prácticas de cosecha y pos cosecha, y por lo tanto, de granos con una calidad fisicoquímica acorde a los criterios establecidos por las NTC de calidad, por eso el orden de importancia de las variables que componen el subsistema Calidad de Cacao corresponde a la agregación de las variables Calidad Sensorial del licor de cacao, Calidad Fisicoquímica del grano y Prácticas de Beneficio. Las primeras dos corresponden a resultados de laboratorio y la tercera a información suministrada por el productor.

A continuación se describen los procedimientos realizados para generar cada una de las variables intermedias requeridas para generar la variable final del subsistema calidad de cacao, así mismo se explican los resultados obtenidos.

3.3.3.1. Comportamiento del subsistema Calidad sensorial del licor de Cacao.

El mercado nacional e internacional cada vez demanda más los denominados cacaos finos y de aroma, sin embargo, producir cacao con esos atributos potencia la complejidad de los diversos sistemas de producción, que es el indicador final que se propone calcular.

Características como el sabor y el olor solo se pueden detectar a través del gusto y el olfato, por lo tanto, las evaluaciones de los aspectos fisicoquímicos del cacao se quedan cortas para proporcionar información de esas cualidades, entonces, la calidad sensorial del licor de cacao es la variable más importante del índice de calidad propuesto.

La calidad sensorial del licor de cacao corresponde a la agregación de tres variables: Aromas Específicos, Sabores Básicos y Defectos, estas corresponden a la clasificación de atributos empleada generalmente por las evaluaciones organolépticas para construir un perfil sensorial (CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; Machado Cuellar et al., 2018; Moreno-martínez et al., 2019; Quintana Fuentes et al., 2018)

El proceso de agregación y jerarquización de variables para calcular la Calidad sensorial del licor de cacao se presentan la Figura 22.

Las variables de entrada (Fase 3) para calcular las variables Aromas Específicos, Sabores Básicos y Defectos corresponden a los atributos detectados por un panel de evaluadores expertos durante la valoración descriptiva de licor de cacao, todos medidos en una escala de 0 a 10 según la intensidad percibida en cada muestra.

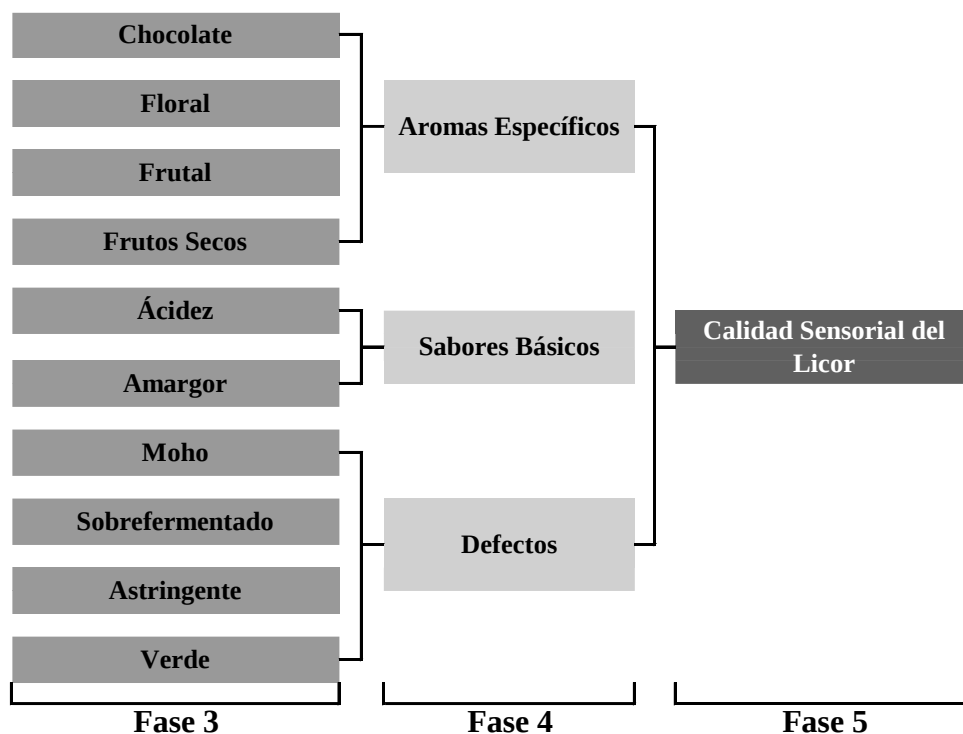


Figura 22 Estructura jerárquica del subsistema Calidad Sensorial del Licor de Cacao

Los aromas específicos corresponden a notas agradables y deseables en el sabor de la muestra, dentro de estos el sabor que siempre debe estar presente y predominar es el de chocolate, por eso es la entrada más importante de esta agregación. Un cacao sin notas de chocolate es automáticamente descartado en el mercado de cacaos finos y de aroma.

Los demás aromas se consideran secundarios, por ser opcionales su jerarquización se realizó conforme la demanda y disposición del mercado internacional a pagar más por él.

Respecto a los sabores básicos, tanto el amargo como la acidez por naturaleza están presentes en cierto grado, sin embargo, la presencia excesiva de estos atributos puede resultar desagradable. Los ácidos acético y láctico se producen durante la fermentación, el

primero es volátil y el segundo puede reducirse a través de un adecuado proceso de secado, entonces un exceso de acidez se relaciona con un secado demasiado rápido, no obstante, durante la transformación se pueden tomar medidas para corregir la acidez aunque se limite la formación del sabor a chocolate y se aumente el amargor, un exceso de este último se asocia con fermentación insuficiente o con el material genético sembrado, no obstante, este defecto se considera menos grave que la acidez excesiva (CAOBISCO/AEC/FCC, 2015).

Dentro de los defectos, el moho es el sabor más desagradable porque una mínima presencia (3%) de granos mohosos es suficiente para transmitir ese sabor indeseado al licor y al producto transformado. La fermentación excesiva produce sabor a jamón con un fondo pútrido, amoniacal y hasta jabonoso/fenólico por lo cual el sabor sobrefermentado es el segundo más importante. Finalmente está la Astringencia, que a pesar de ser permisible en cierto grado, por la presencia de cafeína del cacao, en exceso generalmente corresponde a granos sin fermentar (pizarrosos) (Afoakwa et al., 2008; CAOBIISCO/AEC/FCC, 2015).

Después de definir y ordenar las variables, según la jerarquía, se establecieron las funciones de pertenencia considerando la escala de intensidad de los atributos empleada y reportada por (Grupo de Investigación Análisis Sensorial, 2019), de manera que se transformaran los resultados (medidos en una escala 0 a 10) a grados de satisfacción (de 0 a 1), para homologar la escala con la de los otros indicadores calculados aquí.

La función de pertenencia para varias variables de entrada es la misma porque comparten la escala de medida, entonces en la Tabla 39 se presentan los tres tipos de funciones, formas y parámetros para calcular la Calidad Sensorial del licor de cacao.

Tabla 39 Forma y parámetros de las funciones de pertenencia de las variables de entrada para calcular la variable Calidad Sensorial del licor

Variable de Entrada	Forma de la Función y Parámetros	
Chocolate, Floral, Frutal & Frutos Secos		3; 7
Amargo & Astringente		3; 7
Moho, Sobrefermentado, Ácido & Verde		1; 7

Posteriormente se definió la base de las reglas para calcular las variables Aromas Específicos (Tabla 40), Sabores Básicos (Tabla 41) y Defectos (Tabla 42) empleando un operador de agregación tipo FIS.

Tabla 40 Conclusiones de reglas para calcular la variable Aromas específicos

Chocolate	Floral	Frutal	Frutos Secos	Aromas Específicos
Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Bajo	Alto	0,15
Bajo	Bajo	Alto	Bajo	0,26
Bajo	Bajo	Alto	Alto	0,4
Bajo	Alto	Bajo	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Bajo	Alto	0,49
Bajo	Alto	Alto	Bajo	0,54
Bajo	Alto	Alto	Alto	0,75
Alto	Bajo	Bajo	Bajo	0,35
Alto	Bajo	Bajo	Alto	0,46
Alto	Bajo	Alto	Bajo	0,51
Alto	Bajo	Alto	Alto	0,72
Alto	Alto	Bajo	Bajo	0,74
Alto	Alto	Bajo	Alto	0,78
Alto	Alto	Alto	Bajo	0,85
Alto	Alto	Alto	Alto	1

Tabla 41 Conclusiones de reglas para calcular la variable Sabores Básicos

Acidez	Amargor	Sabores Básicos
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,4
Alto	Bajo	0,5
Alto	Alto	1

Tabla 42 Conclusiones de reglas para calcular la variable Defectos

Moho	Sobrefermentado	Astringente	Verde	Defectos
Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Bajo	Alto	0
Bajo	Bajo	Alto	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	Alto	0
Bajo	Alto	Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	Bajo	Alto	0
Bajo	Alto	Alto	Bajo	0
Bajo	Alto	Alto	Alto	0
Alto	Bajo	Bajo	Bajo	0,4
Alto	Bajo	Bajo	Alto	0,45
Alto	Bajo	Alto	Bajo	0,5
Alto	Bajo	Alto	Alto	0,55
Alto	Alto	Bajo	Bajo	0,6
Alto	Alto	Bajo	Alto	0,7
Alto	Alto	Alto	Bajo	0,75
Alto	Alto	Alto	Alto	1

Después de calcular las variables de la Fase 4 se procedió a agregarlas para calcular la variable Calidad Sensorial (Fase 5), usando un operador FIS. Los valores definidos como conclusiones de las reglas corresponden a los que se muestran en la Tabla 43.

Tabla 43 Conclusiones de reglas para calcular la variable Calidad Sensorial

Aromas Específicos	Sabores Básicos	Defectos	Calidad Sensorial
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,3
Bajo	Alto	Bajo	0,4
Bajo	Alto	Alto	0,7
Alto	Bajo	Bajo	0,45
Alto	Bajo	Alto	0,75
Alto	Alto	Bajo	0,85
Alto	Alto	Alto	1

3.3.3.2. Comportamiento del Subsistema Calidad FísicoQuímica del Grano.

El subsistema de calidad fisicoquímica del grano proporciona, principalmente, información respecto a la salubridad del cacao, ya que se evalúan defectos como metales (Cd), acidez (pH), presencia de moho, daños por insectos, impurezas, granos germinados, aglomerados y vacíos. Además de informar sobre la calidad de la fermentación de los granos. Todas estas variables, en conjunto, repercuten en la formación de sabores, y por tanto, en el producto final transformado.

Las variables de entrada y su jerarquía, así como las variables generadas en cada fase anterior al cálculo de la variable Calidad Fisicoquímica del grano están en la Figura 23.

Jerárquicamente la variable Química tiene mayor importancia que la Física porque en ella se considera la acumulación de Cd en la almendra del cacao, metal que a largo plazo tiene consecuencias sobre la salud humana, como cáncer y daño en los riñones y huesos (CAOBISCO/AEC/FCC, 2015), razón por la que el mercado europeo, desde el 01 de Enero de 2019, fijó un máximo de 0,8 mg/kg de Cd para los productos con un contenido de materia seca total de cacao mayor que 50% (Comisión Europea, 2014).

Por otro lado, la variable pH del grano fermentado y seco se considera esencial para la calidad sensorial, valores menores que 5,0 pueden reflejar exceso de ácido láctico y desarrollo insuficiente del sabor del chocolate, lo ideal es un pH entre 5,0 y 5,4 (Amorim Homem de Abreu Loureiro et al., 2017; CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; Fedecacao, 2004).

Otras variables químicas como teobromina, cafeína, porcentaje de grasa, entre otras, por limitaciones de recursos no fueron incluidas en el modelo propuesto, pero podrían serlo.

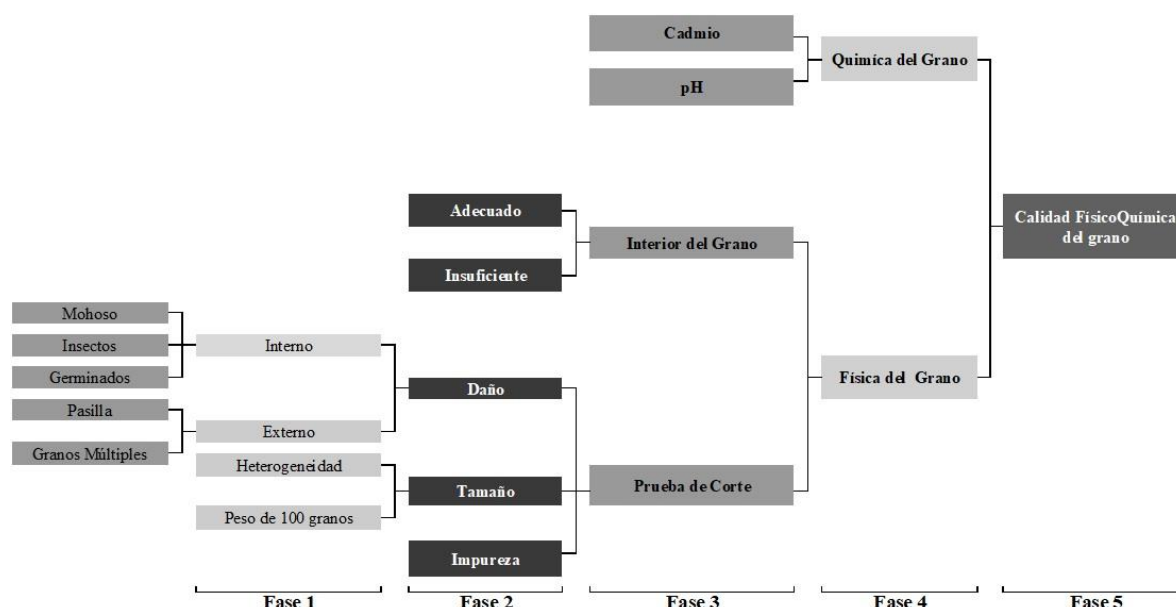


Figura 23 Estructura jerárquica del subsistema Calidad Fisicoquímica del grano de Cacao

Las variables Físicas corresponden a los parámetros definidos por la prueba de corte, que es el test de calidad más utilizado a nivel mundial para el cacao en grano. Por la importancia de la evaluación de la fermentación a través del corte longitudinal en el medio de los granos (300 internacionalmente y 100 a nivel nacional), y para efectos de simplificar la cantidad de reglas resultantes de la agregación de variables, se hizo la distinción entre Interior del grano y el resto de parámetros considerados en la Prueba de Corte.

La variable con mayor peso es Interior del grano, que hace referencia a la coloración interna de la almendra y la profundidad de sus estrías, ambas características permitieron clasificar los granos en tres grupos conforme la calidad de la fermentación que recibieron, (adecuado, insuficiente, pizarroso), se calcula la proporción de granos en cada grupo, como la sumatoria de los tres grupos es igual a los 100 granos, entonces se consideran solo dos de los grupos (adecuado e insuficiente) para evitar redundancia en la variable agregada.

La variable Prueba de Corte se refiere al resto de criterios evaluados durante el test, conforme la NTC 1252, e integra las variables Daño, Tamaño e Impurezas.

La variable Daño corresponde a la agregación de defectos físicos a nivel interno y externo. Interno tiene mayor importancia porque incide directamente en la salubridad del grano, condición que es de gran importancia por ser un alimento. Mientras que el daño Externo aunque pueden alterar el sabor no afecta directamente la salubridad del grano.

A nivel Interno la variable más importante es el Moho, se asocia con la formación de hongo perceptible a la vista y que afecta negativamente el olor y sabor del cacao, incluso después de transformado. Seguidamente están los daños por Insectos, que se refiere básicamente a las perforaciones hechas por insectos y que alteran la apariencia física del grano. Finalmente están los granos Germinados que son aquellos cuya testa o tegumento ha sido perforada debido al crecimiento del embrión o radícula (ICONTEC, 2003).

Como daños Externos se considera la variable Pasilla, que se refiere a los granos vacíos, y la de Granos Múltiples que son la aglomeración de dos o más granos, producto de fallas en el proceso de fermentación y secado o por ataque de hongos en la mazorca. En ambos casos se ve alterada la uniformidad de la muestra, sin embargo se considera más perjudicial para la calidad la pasilla porque su contenido de almendra suele ser mínimo e incluso nulo, mientras que en los granos múltiples hay presencia de almendra al interior de los granos.

Después del Daño la variable agregada más importante es Tamaño, ésta tiene en cuenta además del peso de los granos de cacao (índice de grano) la heterogeneidad de los mismos. Conforme la NTC 1252, la masa mínima de 100 granos de cacao deben ser de 100 g, es decir que un grano de cacao debe pesar al menos 1,0 g (ICONTEC, 2003).

Sin embargo, el peso del grano no es suficiente cuando hay mucha variabilidad dentro de una misma muestra, esto se debe a que los transformadores del cacao buscan garantizar siempre la misma calidad y para eso debe haber uniformidad en el cacao que compran, además resulta más difícil la limpieza eficaz de los granos (CAOBISCO/AEC/FCC, 2015). Máximo el 12% de los granos deben pesar $\pm 33\%$ del peso medio (ICONTEC, 2003).

Finalmente se considera la variable Impureza, que es toda materia extraña que influye en el rendimiento del material comestible, el sabor y la salubridad del cacao

Una vez definidas conceptualmente cada una de las variables de entrada se procedió a diseñar sus funciones de pertenencia, la forma y los parámetros, como muestra la Tabla 44.

Posteriormente se realizaron los procedimientos de agregación de cada fase, para lo cual se requirió definir las conclusiones a la base de reglas como se muestra en la Tabla 45,

Tabla 46, Tabla 47, Tabla 48, Tabla 49, Tabla 50, Tabla 51, Tabla 52 y Tabla 53, en todos los casos se empleó un operador de agregación tipo FIS definido a partir del conocimiento experto.

Tabla 44 Forma y parámetros de las funciones de pertenencia de las variables de entrada para calcular la variable Calidad FísicoQuímica del grano

Variable de Entrada	Forma de la Función y Parámetros	Fuente
Cadmio (mg/kg)	 0; 0,8	(Comisión Europea, 2014)
pH	 4,5; 5; 5,5; 6,0	(Amorim Homem de Abreu Loureiro et al., 2017; CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; Fedecacao, 2004)
Interior del grano Adecuado (%)	 60 ; 95	(CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; ICONTEC, 2003)
Interior del grano Insuficiente (%)	 0 ; 10	(CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; ICONTEC, 2003)
Mohoso (%)	 0 ; 2	(CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; ICONTEC, 2003)
Insectos, Germinados, Granos Múltiples & Pasilla (%)	 1 ; 2	(CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; ICONTEC, 2003)
Heterogeneidad (%)	 0 ; 33	(ICONTEC, 2003)
Peso de 100 granos (g)	 80 ; 120	(CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; ICONTEC, 2003)
Impurezas (%)	 0 ; 0,3	(CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; ICONTEC, 2003)

Tabla 45 Base de reglas para generar la variable Química

Cadmio	pH	Química
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,4
Alto	Bajo	0,6
Alto	Alto	1

Tabla 46 Base de reglas para generar la variable Daño Interno

Moho	Insectos	Germinado	Interno
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0
Bajo	Alto	Bajo	0
Bajo	Alto	Alto	0
Alto	Bajo	Bajo	0,25
Alto	Bajo	Alto	0,45
Alto	Alto	Bajo	0,5
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 47 Base de reglas para generar la variable Daño Externo

Pasilla	Multiples	Externo
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,3
Alto	Bajo	0,6
Alto	Alto	1

Tabla 48 Base de reglas para generar la variable Daño

Interno	Externo	Daño
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,5
Alto	Bajo	0,7
Alto	Alto	1

Tabla 49 Base de reglas para generar la variable Tamaño

Heterogeneidad	Peso	Tamaño
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,4
Alto	Bajo	0,5
Alto	Alto	1

Tabla 50 Base de reglas para generar la variable Prueba de Corte

Daño	Tamaño	Impurezas	Prueba de Corte
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,1
Bajo	Alto	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Alto	0,35
Alto	Bajo	Bajo	0,65
Alto	Bajo	Alto	0,7
Alto	Alto	Bajo	0,85
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 51 Base de reglas para generar la variable Interior del Grano

Adecuado	Insuficiente	Interior del Grano
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,3
Alto	Bajo	0,7
Alto	Alto	1

Tabla 52 Base de reglas para generar la variable Física

Interior del grano	Prueba de corte	Física
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,3
Alto	Bajo	0,55
Alto	Alto	1

Tabla 53 Base de reglas para generar el Índice de Calidad Fisicoquímica del grano

Química	Física	Calidad Fisicoquímica
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,3
Alto	Bajo	0,6
Alto	Alto	1

3.3.3.3. Comportamiento del Subsistema Prácticas de Beneficio.

Las operaciones de cosecha de las mazorcas, fermentación, secado, limpieza, selección, clasificación, empaque y almacenamiento de los granos, son determinantes de la calidad del cacao (Cubillos et al., 2008; Fedecacao, 2004). Este conjunto de actividades se denomina beneficio del cacao, y generalmente, la técnica, el método, la duración y las herramientas con que se desarrolla cada una varían conforme las tradiciones locales (Cardona, 2016).

Por ejemplo, el modo en que se llevan a cabo la fermentación y el secado del cacao propicia las condiciones necesarias para que complejas reacciones bioquímicas ocurran en los granos y se desarrollen el color café y el sabor a chocolate. Ambos procesos son esenciales para la formación de sabores apropiados a partir de precursores. Asimismo, el almacenamiento de las mazorcas antes de la fermentación tiene un impacto en el volumen de pulpa por almendra (Kongor et al., 2013).

Entonces, la variación en las prácticas de beneficio, entre fincas y dentro de las fincas, implica que no se puede garantizar la calidad del cacao producido, haciendo que se afecte de manera general su mercado (Cardona, 2016).

La variable Prácticas de Beneficio sirve para saber cómo se desarrollan dichas actividades a nivel de finca y proponer ajustes conforme a los criterios establecidos por investigaciones en el área y las condiciones de cada productor.

Dado que la literatura da mayor importancia a la fermentación y al secado por los procesos químicos y bioquímicos que ocurren en el grano durante estas fases, entonces se les asignó mayor peso jerárquico a estas variables, como muestra la Figura 24.

La fermentación es la variable más relevante porque por el surgen los precursores de sabor en los granos de cacao, se generan los aminoácidos péptidos y los azúcares reducidos que forman los sabores volátiles (Kongor et al., 2016; Lima et al., 2011).

La fermentación consiste en amontonar las semillas que están al interior de las mazorcas de cacao durante varios días con el fin de que los microorganismos descompongan la pulpa

blanca y azucarada que las recubre cuando están en fresco, se cubren las semillas, generalmente con hojas de plátano para aumentar la temperatura hasta que el germen de la semilla muera e inicien las reacciones bioquímicas en su interior (Cubillos et al., 2008).

De los factores que influyen en el proceso de fermentación se destacan: el tiempo, que depende del lugar y el material genético; la frecuencia de volteos que facilita la aireación y previene la formación de granos aglomerados, el moho y favorece la uniformidad del proceso; y el tipo de fermentador (cajón de madera, costal, balde plástico o arrume).

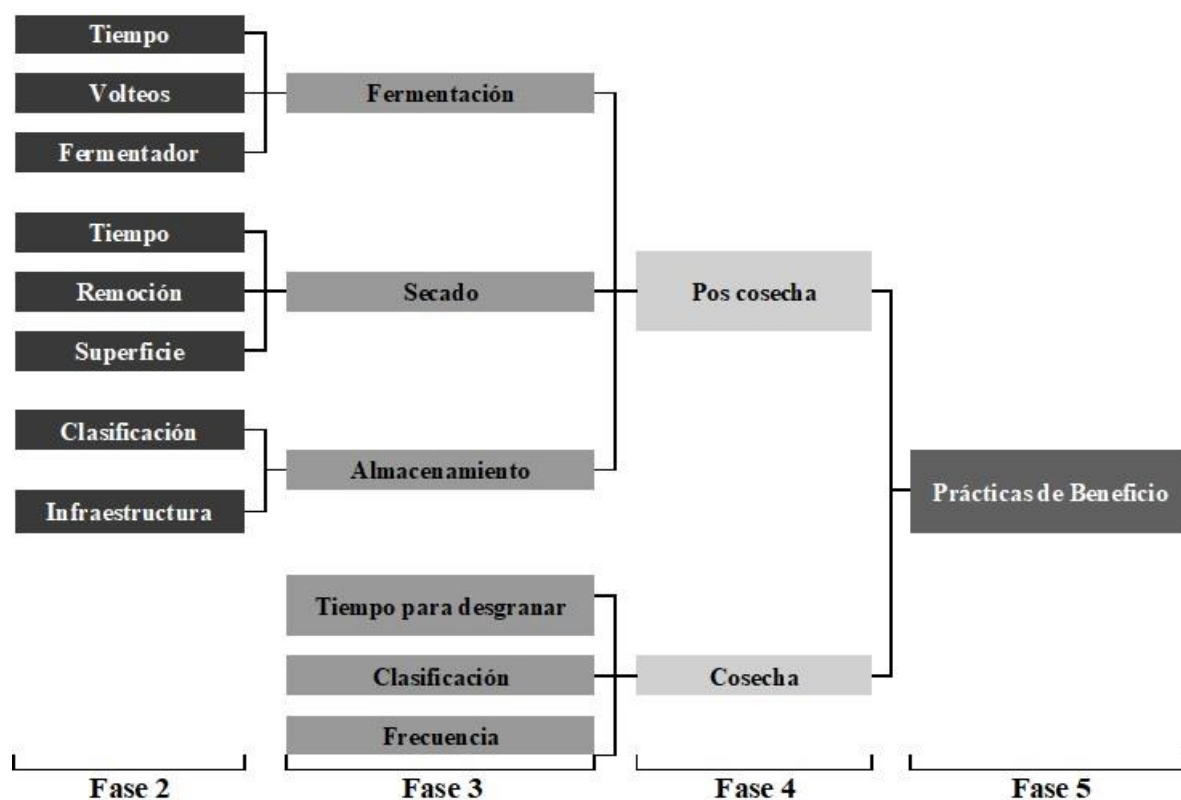


Figura 24 Estructura jerárquica del subsistema Prácticas de Beneficio

Además de la fermentación, el proceso de secado es clave para que se aumenten nuevos componentes del sabor y pérdidas de integridad de membranas que inducen a la formación del color café, la reducción del amargo y la astringencia. Un secado muy rápido resulta en la acumulación de acidez en los granos, mientras que un secado demasiado lento provoca una baja acidez, un color más pobre y una alta presencia de mohos (Kongor et al., 2016).

Dentro de los factores claves que se deben tener en cuenta para el secado están: el tiempo, sujeto a la cantidad de horas sol y su intensidad; la remoción de los granos para

garantizar la uniformidad del proceso; y finalmente, la superficie sobre la que se seca (Casa elba, marquesina o en el piso) (Cubillos et al., 2008).

Una vez el cacao esté adecuadamente fermentado y seco, el almacenamiento es esencial para garantizar la calidad del grano seco, para eso es necesario seleccionar los granos defectuosos y eliminarlos, posteriormente los granos secos, limpios y clasificados se deben empacar en sacos limpios, sobre estivas y aislados de olores fuertes, durante un período máximo de 3 meses en zonas tropicales como Colombia (Cubillos et al., 2008).

Si bien las prácticas de pos cosecha descritas anteriormente son fundamentales para garantizar la calidad de cacao, las prácticas de cosecha también impactan el resultado final de calidad de los granos. La recolección de las mazorcas maduras debe hacerse semanalmente en picos de producción o cada 2 o 3 semanas el resto del año, respetar esta frecuencia evita que se sobremaduren y germinen los frutos; las mazorcas sanas no deben ser mezcladas con aquellas que presenten daños por plagas o enfermedades; el intervalo entre la recolección y la apertura de las mazorcas no debe ser mayor que 7 días y una vez abiertas las mazorcas los granos deben iniciar la fermentación antes de 24 horas (CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; Cubillos et al., 2008).

La información capturada a través de la encuesta realizada por el agrónomo en la parte inferior del registro agronómico (Ver Anexo 2) se categorizó como en la Tabla 54.

Tabla 54 Categorización de las variables de entrada para calcular Prácticas de Beneficio

Variable de Entrada	Descripción	Valor asignado
Fermentación volteos	Espera 48 h para el primer volteo y luego remueve cada 24 h	1
	Si remueven con una frecuencia distinta	1,5
	Si no remueve	0
Fermentador	Cajón de Madera	1
	Lonas	2
	Balde plástico	3
Secado Volteos	Sí remueve	1
	No Remueve	0
Superficie de secado	En el suelo	1
	Marquesina	2
	Casa Elba	3
Clasificación por calidad	Sí Clasifica	1
	No Clasifica	0
Clasificación de la cosecha por variedad	Sí Clasifica	1
	No Clasifica	0

Con la priorización de las variables y la transformación de las variables de entrada cualitativas en categorías, se definieron las funciones de pertenencia, la forma y los parámetros de cada variable de entrada, tal y como se presenta en la Tabla 55.

Después se establecieron las conclusiones a las reglas para calcular las variables agregadas asociadas a la variable Prácticas de Beneficio, el conjunto de la base de reglas empleado se presenta en las Tabla 56-61.

Tabla 55 Forma y parámetros de las funciones de pertenencia de las variables de entrada para calcular la variable Prácticas de Beneficio

Variable de Entrada	Forma de la Función y Parámetros	Fuente
Tiempo de fermentación (# días)	 2; 4; 5; 7	(CAOBISCO/AEC/FCC, 2015; Cubillos et al., 2008)
Fermentación Volteos (#)	 0; 1; 2	(Cardona, 2016)
Fermentador	 1; 3	(Cubillos et al., 2008)
Tiempo de Secado (# días)	 3; 6	(Cubillos et al., 2008)
Secado Volteos (#)	 0; 1	(Fedecacao, 2004)
Superficie Secado	 1; 3	(Cardona, 2016)
Tiempo para desgranar (# días)	 1; 2	(CAOBISCO/AEC/FCC, 2015)
Clasificación cosecha	 0; 1	(CAOBISCO/AEC/FCC, 2015)
Clasificación Almacenamiento	 0; 1	(CAOBISCO/AEC/FCC, 2015)
Infraestructura (%)	 30; 70	Valoración Agrónomo

Tabla 56 Base de reglas para generar la variable Fermentación

Tiempo	Volteos	Fermentador	Fermentación
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,15
Bajo	Alto	Bajo	0,3
Bajo	Alto	Alto	0,4
Alto	Bajo	Bajo	0,5
Alto	Bajo	Alto	0,7
Alto	Alto	Bajo	0,9
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 57 Base de reglas para generar la variable Secado

Tiempo	Remoción	Superficie	Secado
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,3
Bajo	Alto	Bajo	0,4
Bajo	Alto	Alto	0,55
Alto	Bajo	Bajo	0,35

Alto	Bajo	Alto	0,45
Alto	Alto	Bajo	0,85
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 58 Base de reglas para generar la variable Almacenamiento

Clasificación	Infraestructura	Almacenamiento
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,4
Alto	Bajo	0,6
Alto	Alto	1

Tabla 59 Base de reglas para generar la variable Pos cosecha

Fermentación	Secado	Almacenamiento	Pos cosecha
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,3
Bajo	Alto	Bajo	0,4
Bajo	Alto	Alto	0,5
Alto	Bajo	Bajo	0,45
Alto	Bajo	Alto	0,6
Alto	Alto	Bajo	0,65
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 60 Base de reglas para generar la variable Cosecha

Tiempo de desgrane	Clasificación Cosecha	Frecuencia	Cosecha
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,3
Bajo	Alto	Bajo	0,5
Bajo	Alto	Alto	0,55
Alto	Bajo	Bajo	0,45
Alto	Bajo	Alto	0,43
Alto	Alto	Bajo	0,8
Alto	Alto	Alto	1

Tabla 61 Base de reglas para generar el Índice de las Prácticas de Beneficio

Pos cosecha	Cosecha	Prácticas Beneficio
Bajo	Bajo	0
Bajo	Alto	0,5
Alto	Bajo	0,7
Alto	Alto	1

Finalmente, para calcular el índice del subsistema Calidad del cacao, se agregaron las variables Calidad sensorial del licor de cacao, Calidad fisicoquímica del grano y Prácticas de beneficio empleando un operador FIS y la base de reglas que muestra la Tabla 62.

Tabla 62 Base de reglas para calcular el Índice del subsistema Calidad del cacao

Sensorial	Fisicoquímica	Prácticas de Beneficio	Calidad
Bajo	Bajo	Bajo	0
Bajo	Bajo	Alto	0,1

Bajo	Alto	Bajo	0,2
Bajo	Alto	Alto	0,4
Alto	Bajo	Bajo	0,6
Alto	Bajo	Alto	0,8
Alto	Alto	Bajo	0,9
Alto	Alto	Alto	1

3.3.3.4. Calibración del Modelo de Subsistema de Calidad de Cacao.

Una vez definidos los criterios anteriormente expuestos se procedió a calcular el índice de calidad de cacao en GeoFis, y empleando los datos de las fincas de Chaparral para calibrar el modelo empírico propuesto, los resultados se presentan en la Tabla 63.

El índice de calidad de cacao resultante es un valor adimensional entre 0 y 1, donde mayor proximidad a 1 significa mejor calidad y más cerca a 0 peor calidad. Asimismo para las variables agregadas de fases intermedias, las cuales son tenidas en cuenta para evaluar y ajustar el modelo conforme el comportamiento real de los sistemas de producción. Los resultados de las variables agregadas en fases intermedias están en el Capítulo 4 porque a partir de estas se identifican las fortalezas y los limitantes de cada sistema.

Tabla 63 Resultados del Subsistema Calidad de Cacao en las fincas de Chaparral

Finca	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Índice Calidad de Cacao	0,510	0,446	0,507	0,453	0,548	0,467	0,508	0,515	0,497	0,466

Las fincas de Chaparral tuvieron una calidad de cacao Media (entre 0,45 y 0,55) como muestra la Tabla 63, con una variabilidad relativamente baja entre fincas pero que refleja que tienen mucho por mejorar para poder participar en el mercado de cacao fino y de aroma, para el cual se esperaría, por lo menos, un índice de calidad de cacao de 0,7.

Se destacan los resultados de C5 por ser el mayor y C2 por ser el más bajo de la zona, en el caso de C5 se resalta que es un productor relativamente joven (43 años) cuyo cultivo principal es el cacao y con disponibilidad de mano de obra de sus dos hijos; mientras que C2 aunque es un productor joven (44 años) la mayor inversión de dinero y tiempo se la dedica a la ganadería, incluso ha deforestado parte del cacaotal por hacer potreros.

Cuatro de las diez fincas (C2, C4, C6, C10) obtuvieron una puntuación inferior a 0,5. En el caso de C4 es un productor de 75 años que permanece solo en su finca la mayor parte del tiempo, la finca tiene una extensión de 100 ha, para llegar desde la casa al lote de cacao en

promedio debe caminar 30 min, y para sacar los sacos de grano seco al mercado gasta 1h30min a caballo y otros 30 min en carro, estas condiciones influyen en la calidad del cacao porque limitan que la cosecha y despulpado se pueda hacer en la frecuencia correcta.

C6 es un productor de cacao relativamente nuevo, compró la finca con el lote establecido pero desconoce el manejo del cultivo y las prácticas de beneficio, presta poco interés en capacitarse ya que la mayor parte del tiempo se dedica a otros oficios fuera de la finca, incluso fuera del municipio.

El lote de cacao de C10 pertenece a una pareja en situación de divorcio, la mujer que siempre se había hecho cargo solo de las labores domésticas empezó a ocuparse también de las labores del cultivo, que antes estaban en manos solo del hombre, entonces la productora que está en proceso de aprendizaje debe dividir su tiempo entre las tareas de la casa, el cuidado de los nietos y el sistema de producción de cacao, conduciendo a falencias como por ejemplo, la cosecha de mazorcas sobremaduras por la dificultad de estar recorriendo el lote cada 2 o 3 semanas, esto lleva a que se produzcan granos germinados y con características organolépticas desagradables.

3.3.3.5. Validación del Modelo de Subsistema de Calidad de Cacao.

Una vez calibrado el modelo empírico con los datos de Chaparral se procedió a validar el mismo con los datos de Mariquita y Ortega, los resultados se muestran en la Tabla 64 y la Tabla 65, respectivamente.

Tabla 64 Resultados del Subsistema Calidad de Cacao en las fincas de Mariquita

Finca	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Índice Calidad de Cacao	0,479	0,483	0,486	0,459	0,458	0,526	0,507	0,485	0,501	0,536

Conforme las expectativas el índice de calidad de cacao más alto de las treinta fincas analizadas se presenta en Mariquita (M6 y M10). Sin embargo se esperaba un valor superior porque estas fincas cuentan con infraestructura más adecuada para realizar las actividades del proceso de pos cosecha y recientemente están en capacitación constante para mejorar la calidad del grano, sin embargo es de resaltar que la mayoría del cacao establecido en esa zona corresponde a la variedad CCN51, que según los expertos es más

ácido y requiere un manejo pos cosecha diferencial, entonces la formación de aromas y sabores finos puede estar limitada por dicha característica. Como la variable con mayor importancia dentro del índice de Calidad de cacao es la Calidad Sensorial este aspecto puede ser preponderante al momento de computar los resultados.

M6 es la finca con mayor cantidad de material vegetal híbrido y criollo de Mariquita, sin embargo el productor desconoce el manejo del mismo, incluso al momento de la visita manifestó intención de eliminar esos árboles para reemplazarlos por CCN51 por su potencial de rendimiento productivo, sin embargo la parte del lote con CCN51 carecía del manejo que exige dicho material para generar los rendimientos mostrados en investigación.

M10 corresponde a una finca que actualmente exporta cacao, que cuenta con la infraestructura más adecuada de las tres zonas para la fermentación (cajones de madera escalonados) y el secado (casa elba). Si bien posee algunos árboles criollos son pocos en proporción del total de árboles en producción, lo que explica que aunque haya una adecuada formación de sabores básicos y control de defectos carezca de la formación de aromas, ya que el material vegetal predominante en la finca es CCN51, aunque vale la pena resaltar que las prácticas de pos cosecha para ese material se desarrollan por separado.

Los resultados del índice global de calidad entre las fincas de Mariquita fueron menos heterogéneos que en los casos de Chaparral y Ortega, las desviaciones para cada zona fueron de 0,026, 0,032 y 0,039 respectivamente.

Es decir que la mayor heterogeneidad (desviación) entre fincas de un mismo municipio en el índice global de calidad de cacao se presentó en Ortega (Tabla 65), explicado principalmente por el comportamiento de O6 que fue el más bajo de las treinta fincas analizadas (Comparar Tabla 63, Tabla 64 y Tabla 65), dentro de las causas estructurales de dichas falencias está la edad de la productora (76 años), su quebrantado estado de salud, la ausencia de mano de obra adicional para realizar las labores del sistema de producción y la necesidad de vender cuanto antes la poca cantidad de grano producida, haciendo que no se respeten los tiempos y etapas mínimas para alcanzar unas buenas prácticas de beneficio.

Tabla 65 Resultados del Subsistema Calidad de Cacao en las fincas de Ortega

Finca	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10
Índice Calidad de Cacao	0,517	0,493	0,501	0,503	0,491	0,381	0,457	0,503	0,499	0,467

La historia y tradición del cultivo en el sur del Tolima (Chaparral y Ortega) influyen positivamente para que los productores hayan recibido y sigan recibiendo capacitación y subvenciones en especie por parte de instituciones como Agrosavia, Fedecacao, USAID, entre otras, todas enfocadas en mejorar el proceso de beneficio para garantizar una mejor calidad del cacao. No obstante, por la cantidad de dinero y tiempo invertidos por esas instituciones de fomento se esperaba una mayor diferencia entre las fincas de los municipios del sur y las del norte del departamento.

3.4. Índice de Complejidad de los Sistemas de Producción de Cacao en Tres Zonas del Tolima

Con un operador de agregación tipo WAM y asignando a cada índice de los subsistemas Suelo-Cultivo y Socioeconómico un peso de 0,4 y al índice del subsistema Calidad de cacao un peso de 0,2 se calculó el índice de complejidad del sistema de producción de cacao en cada finca.

Para las fincas donde no fue posible completar la información socioeconómica tampoco se pudo calcular el índice de complejidad porque carecen del resultado del índice Socioeconómico. Para todas las demás, a continuación se presentan los resultados.

3.4.1. Índice de Complejidad de los Sistemas de Producción de Cacao en Chaparral

En la Tabla 66 se presentan los resultados del índice de complejidad de los sistemas de producción de cacao de las nueve fincas de Chaparral, con un valor promedio de 0,486 y una desviación de 0,048. Esto significa que la complejidad de la zona tiene un valor Medio pero inferior a 0,5, esto es especialmente cierto para C2, C4 y C9.

Tabla 66 Índice de complejidad de los sistemas de producción de cacao en Chaparral

Finca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de Complejidad del S.P. de Cacao	-	0,450	0,512	0,415	0,521	0,516	0,521	0,496	0,409	0,532

El promedio de las diez fincas para los índices Suelo-Cultivo y Calidad de Cacao fueron, 0,500 y 0,491, respectivamente, mientras que para el Socioeconómico, que consideró solo nueve fincas, la media fue de 0,468.

Considerando el valor obtenido para cada finca se concluye que el subsistema más limitante para C2, C4, C5, C8 y C9 fue el Socioeconómico, mientras que para C6, C7 y C10 fue el de Calidad de cacao y para C3 fue el de Suelo-Cultivo.

Lo anterior evidencia que si bien las condiciones de Suelo-Cultivo pueden mejorar, la zona es propicia para desarrollo del cultivo, de manera que una mayor inversión económica en fertilización y manejo del cultivo podrían contribuir a mejorar los rendimientos productivos. Sin embargo es alarmante, aunque conforme se esperaba, que la mayor limitante en la mitad de las fincas corresponde al factor Socioeconómico, eso refleja que las causas estructurales de la limitada complejidad en la zona obedece a aspectos fuera del alcance agronómico, y muestra la necesidad imperante de aumentar la inversión social en la zona si se busca contribuir al desarrollo de los sistemas de producción de cacao.

Se destaca que la finca C7 fue la única de la zona capaz de superar el umbral de 0,5 en los tres subsistemas, por el contrario en las fincas C2, C4 y C9 ninguno de los tres subsistemas consiguió llegar al umbral de 0,5.

3.4.2. Índice de Complejidad de los Sistemas de Producción de Cacao en Mariquita

El índice de complejidad calculado para las siete fincas presentó un promedio para la zona de 0,522 con una desviación de 0,044. A diferencia de Chaparral en Mariquita la mayor parte de las fincas tuvo un índice de complejidad igual o mayor que 0,5, los resultados se presentan la Tabla 67.

Tabla 67 Índice de complejidad de los sistemas de producción de cacao en Mariquita

Finca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de Complejidad del S.P. de Cacao	0,559	0,495	-	0,477	-	0,500	0,576	0,477	0,567	-

Prácticamente M4 y M8 fueron las únicas fincas con valor de complejidad inferior a 0,5, en ambos casos el factor Socioeconómico es el más limitante. Sin embargo, el factor

limitante predominante en la zona fue la Calidad del cacao (el más limitante de M1, M2 y M9). Mientras que Suelo-Cultivo fue el subsistema con menor desempeño de M6 y M7.

Mientras que la finca M9 tuvo valores superiores a 0,5 en los tres subsistemas evaluados, M2 no consiguió superar el mismo umbral en ninguno subsistema.

Aunque no se cuentan con los resultados del factor socioeconómico, se destaca que M10 tuvo valores superiores a 0,53 para los subsistemas Suelo-Cultivo y Calidad de Cacao, mientras que M3 y M5 en los mismos indicadores no superaron el umbral de 0,5.

Con los resultados de los indicadores Suelo-Cultivo y Calidad de cacao para las diez fincas se obtuvo un promedio de 0,511 y 0,491 respectivamente, mientras que el promedio del factor Socioeconómico para las siete fincas disponible fue de 0,551. De forma que la mayor fortaleza de la zona está en el componente Socioeconómico, aunque puede mejorar ampliamente. La mayor debilidad corresponde al índice de Calidad del cacao, lo que puede explicarse en que los productores de la zona apenas están adquiriendo el conocimiento y la experiencia para realizar las prácticas de beneficio razón por la que aún tienen deficiencias que afectan la calidad del grano y del licor, además el material vegetal predominante en la zona puede ser una restricción si no se le hace el manejo y beneficio adecuado.

3.4.3. Índice de Complejidad de los Sistemas de Producción de Cacao en Ortega

Finalmente en la Tabla 71 se presentan los resultados del índice de complejidad para las fincas localizadas en Ortega, que tuvieron una media de 0,485 y una desviación igual a 0,043. Solo tres de las diez fincas superan el umbral de 0,5, esto es preocupante principalmente porque el promedio de los tres subsistemas en la zona fueron menores que 0,5 (Suelo-Cultivo: 0,493; Calidad de Cacao: 0,481 y Socioeconómico: 0,479).

Tabla 68 Índice de complejidad de los sistemas de producción de cacao de Ortega

Finca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de Complejidad del S.P. de Cacao	0,493	0,493	0,491	0,528	0,509	0,426	0,453	0,441	0,565	0,453

En esta zona las fincas O4 y O9 consiguieron alcanzar, por lo menos, un valor de 0,5 en el índice de los tres subsistemas, aunque el mayor limitante en ambos casos fue Calidad de cacao. Muy cerca a estos estuvo O5 pero en Calidad de cacao apenas alcanzó 0,491.

Por el contrario, O10 tuvo desempeños menores que 0,470 en todos los subsistemas, y su peor valor fue en el de Suelo-Cultivo.

Para O1, O2, O7 y O8 el subsistema con menor puntuación fue el Socioeconómico, cercano a 0,475 en las dos primeras fincas pero por debajo de 0,38 en las últimas dos. Para O4, O5, O6 y O9 el mayor limitante fue Calidad de cacao, finalmente para O3 y O10 la mayor debilidad está en Suelo-Cultivo.

Comparando los resultados de las tres zonas se resalta la necesidad de trabajar en el fortalecimiento del tejido social y de las unidades producción de cacao, sobretodo en Chaparral y Ortega, especialmente en las fincas C2, C4, C9, O6, O7 y O8 ya que tuvieron resultados inferiores a 0,42 en el factor Socioeconómico. En el caso de Mariquita, M4 y M8 también deben ser priorizados en el mismo aspecto ya que presentaron resultados Medio Bajos, esto es, menores que 0,45.

En el caso del subsistema Suelo-Cultivo la mayor atención debe enfocarse en Ortega, cuyo promedio general fue el más bajo, destacándose O10 con un índice menor que 0,45. En el caso de Chaparral el promedio general de ese Subsistema fue mayor, sin embargo los casos de C4 y C9 se resaltan por haber obtenido resultados Medio Bajos.

Finalmente, en el subsistema Calidad de cacao O6 fue la única finca, de las treinta, que tuvo un desempeño inferior a 0,45, por lo que merece un esfuerzo adicional que las demás en cuanto a entrenamiento para mejorar sus prácticas de beneficio.

Conclusión de Capítulo

Retomando los resultados matemáticos que se presentaron en este capítulo, en la

Tabla 69 se presenta el valor de los indicadores calculados en la Fase 6 para todas las fincas de los tres municipios que integran la zona de estudio, se resaltan en color rojo los resultados más bajos y en color verde los resultados más altos para cada caso.

Se concluye que el subsistema más limitante de la complejidad de los sistemas de producción de cacao en las fincas de Chaparral y Ortega fue el Socioeconómico, con

una media de 0,468 y 0,479 respectivamente, mientras que para el caso de las fincas de Mariquita fue el subsistema de Calidad de Cacao con un promedio de 0,491 (Ver

Tabla 69).

Tabla 69 Resultados matemáticos de los subsistemas que integran la complejidad de los sistemas de producción de Cacao en el Tolima

	Finca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Complejidad	Chaparral	-	0,450	0,512	0,415	0,521	0,516	0,521	0,496	0,409	0,532
	Mariquita	0,559	0,495	-	0,477	-	0,500	0,576	0,477	0,567	-
	Ortega	0,493	0,493	0,491	0,528	0,509	0,426	0,453	0,441	0,565	0,453
Suelo-Cultivo	Chaparral	0,490	0,495	0,475	0,407	0,549	0,577	0,527	0,494	0,426	0,566
	Mariquita	0,522	0,498	0,496	0,525	0,461	0,469	0,48	0,516	0,54	0,603
	Ortega	0,493	0,513	0,475	0,517	0,495	0,475	0,557	0,475	0,505	0,431
Socioeconómico	Chaparral	-	0,407	0,553	0,404	0,480	0,481	0,521	0,489	0,347	0,532
	Mariquita	0,636	0,499	-	0,437	-	0,518	0,707	0,433	0,626	-
	Ortega	0,482	0,472	0,501	0,550	0,532	0,400	0,347	0,377	0,659	0,469
Calidad	Chaparral	0,510	0,446	0,507	0,453	0,548	0,467	0,508	0,515	0,497	0,466
	Mariquita	0,479	0,483	0,486	0,459	0,458	0,526	0,507	0,485	0,501	0,536
	Ortega	0,517	0,493	0,501	0,503	0,491	0,381	0,457	0,503	0,499	0,467

CAPÍTULO 4. IDENTIFICACIÓN DE PRIORIDADES ESTRATÉGICAS PARA LA COMPLEJIDAD DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CACAO EN TRES ZONAS DEL TOLIMA

Para comprender y explicar lo que sucede al interior de cada finca fue necesario revisar los resultados de fases de agregación anteriores a la generación del indicador final de cada subsistema, pues el valor del índice final de cada subsistema no refleja las heterogeneidades entre fincas, así dos fincas con un índice final cercano a 0,5 pueden tener comportamientos distintos en una o más variables de entrada. La posibilidad de ver cálculos de fases intermedias es una ventaja importante de los modelos FIS en comparación con otras técnicas de inteligencia artificial que producen únicamente la variable de salida final.

A continuación se presentan los resultados por subsistema y por zona, se hace énfasis en los resultados más altos y más bajos de cada zona, además se da una posible explicación a dicho comportamiento. Los cálculos completos para cada variable de entrada y agregada, así como los valores exactos de todas las fases, están disponibles en los Anexos 6, 7 y 8.

4.1. Prioridades a Nivel del Subsistema Suelo- Cultivo

La distribución de las variables agregadas, intermedias y final, del subsistema Suelo-Cultivo para las treinta fincas, usando el gráfico de cajas, se muestra en la Figura 25.

De todos los valores atípicos, solo M10 está por encima de la distribución de datos. Su índice de Suelo-Cultivo se distingue porque el cacao producido es a escala comercial (25 ha). M10 se caracteriza por un alto nivel tecnológico y el agricultor cuenta con formación profesional que aplica para la gestión empresarial de la plantación de cacao. Recibe asistencia técnica con frecuencia y aplica su propio plan de fertilización, además tiene la capacidad financiera suficiente para actuar con rapidez cuando es necesario, por ejemplo, ante la presencia de una plaga o un evento climático extremo, si fuese el caso.

M7 presentó un valor atípico de la variable Productividad del suelo porque sus propiedades físicas y químicas presentan fuertes limitaciones. En Física, sus contenidos de arcilla y limos son 64% y 34% respectivamente; por lo tanto, el grado de satisfacción de la variable de textura es cero. Lo mismo ocurre con la conductividad térmica. Asimismo, en Química los grados de satisfacción son Bajo para Fósforo (3,65 ppm), Bajo para Potasio

(0,148 meq / 100g) y Bajo para Materia Orgánica (2,88%), haciendo que el grado de satisfacción para Química sea cero.

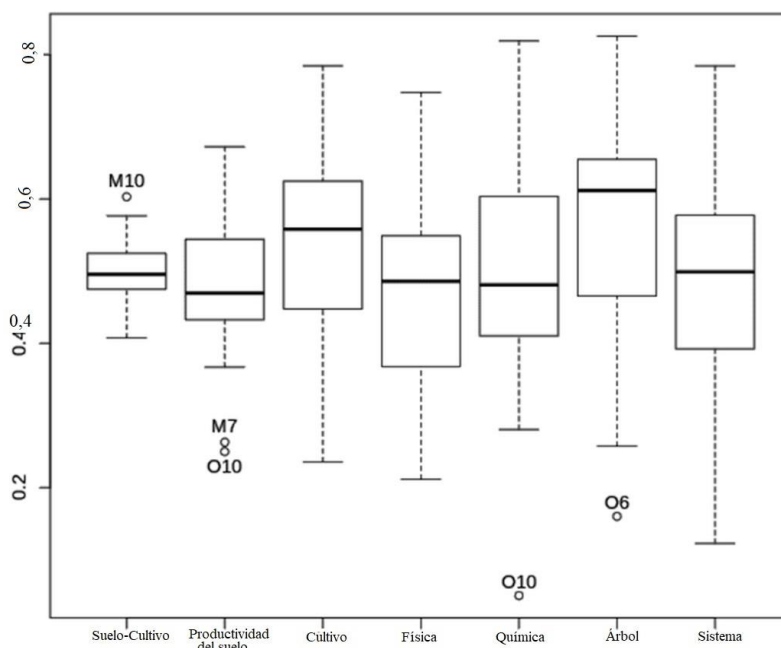


Figura 25 Distribución de la variable final y las variables agregadas intermedias del subsistema suelo-cultivo en las fincas de las tres zonas

Como la textura no es modificable en el corto plazo pero la estructura del suelo puede cambiar, entonces una hipótesis para explicar que la producción de cacao ha disminuido desde 2015 en M7, es que, en esa plantación, el cacao está asociado con el caucho (*Hevea brasiliensis*) que se explota intensivamente. Por lo tanto, los árboles de *Hevea* requieren y consumen muchos nutrientes del suelo, lo que hace posible que los árboles de caucho y cacao compitan por los nutrientes.

La finca O10 combina Alto Cadmio (0,647 mg / kg), Baja Materia Orgánica (2,33%) y Bajo pH (4,98); por lo tanto, su índice de productividad del suelo indica que es marginalmente adecuado para el cacao. Como consecuencia, es un valor atípico en las variables Química y Productividad del suelo.

O6 es un valor atípico para la variable Árbol porque los árboles son más altos que el promedio, 4 m de alto, y se identificaron enfermedades de *Phytophthora* y escoba de bruja. El agricultor tiene 76 años, es analfabeta, vive y trabaja solo en su plantación de cacao y el

resto de actividades de la finca, estas condiciones limitan la gestión de las actividades agrícolas a pesar que estas sean su única fuente de ingresos.

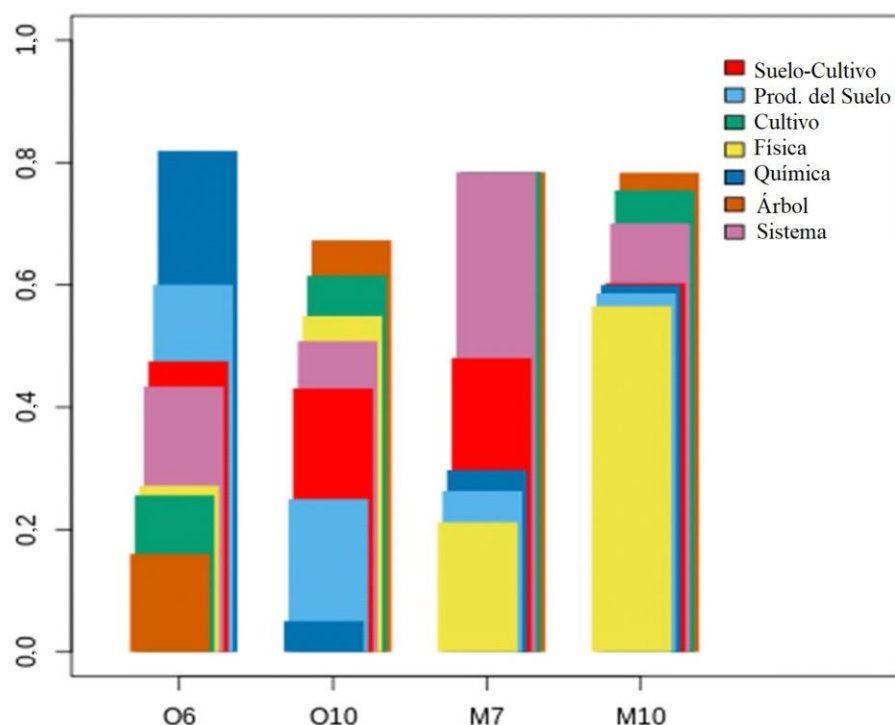


Figura 26 Distribución de las variables agregadas en las fincas con valores atípicos

En la Figura 26 se presentan gráficamente los resultados de las variables intermedias y la final específicamente para las fincas que presentaron algún valor atípico en los indicadores calculados, a partir de ésta se puede evidenciar que si bien las fincas O6, O10 y M7 presentaron un índice del subsistema Suelo-Cultivo inferiores pero próximos a 0,5 las razones para tal comportamiento son diferentes en cada caso, por ejemplo, la mayor limitante de O6 obedece a las condiciones del Cultivo a nivel de Árbol mientras que el mayor potencial que tiene es la variable Química del suelo. Caso contrario ocurre en O10, donde la mayor restricción ocurre en el componente de Química del suelo y la mayor fortaleza se refiere a las condiciones del Cultivo a nivel de Árbol.

En M7 las variables asociadas al Cultivo, Árbol y Sistema, estuvieron bien calificadas, sin embargo la limitante de esa finca se refiere a la Productividad del suelo, tanto por razones de la Física como de la Química del suelo.

Finalmente, M10 obtuvo puntuaciones superiores a 0,5 en todas las variables agregadas intermedias y eso condujo a que presentara la mayor puntuación de la variable agregada final del subsistema Suelo-cultivo.

A nivel de finca los resultados analizados para identificar en cada una los principales factores limitantes que pueden explicar cada situación particular corresponden a los datos de la Tabla 70, Tabla 71, Tabla 72.

En la Tabla 72 se presentan los resultados de las variables agregadas intermedias del subsistema Suelo-cultivo para las fincas localizadas en Ortega. En términos generales se halló que las condiciones del Cultivo eran más favorables que las de Productividad del suelo en esta zona, con excepción de O5 y O6 donde sucede lo contrario.

Los resultados en Química de O10 y de Árbol en O6 fueron preocupantemente bajos, por lo que se esperaría que los productores de estas fincas adopten estrategias para resarcir las condiciones actuales.

O10 llamó la atención por sus niveles atípicos de Cd, indagando por posibles causas de tal resultado se halló que recientemente sobre el borde de la parcela de cacao fue pavimentada la carretera de la vereda, lo que ha sido señalado por (Mite et al., 2010) como una posible causa debido al uso de derivados del petróleo.

Además O10, al igual que la finca O9, presentó un contenido de Materia Orgánica bajo (entre 1 y 3%), lo mismo ocurrió con el pH, arrojando cero como grado de satisfacción en ambas variables, que aportan significativamente a la variable Química.

De las variables calculadas se destaca que en el componente fisicoquímico de suelos los resultados de Mariquita tuvieron la menor variabilidad (desviación de 0,07), en la Física del suelo se destaca que la menor variabilidad estuvo en Chaparral, mientras que en la Química se resalta que la mayor variabilidad fue en Ortega. Por el lado del Cultivo, la mayor variabilidad se presentó en Mariquita (desviación de 0,23).

En Chaparral, el cacao ha estado presente históricamente. Allí es posible encontrar plantaciones con más de 40 años y con árboles criollos o híbridos. Las prácticas culturales se basan en el conocimiento heredado de generaciones anteriores y mediante sesiones de capacitación, los agricultores solo aplican ocasionalmente las recomendaciones de los expertos porque tienen más confianza en su propia experiencia.

Como han estado produciendo cacao durante mucho tiempo, han experimentado varias veces la caída del precio del grano, para afrontarlo, suelen desarrollar simultáneamente otras actividades económicas, por lo cual deben distribuir su tiempo para llevar a cabo el desarrollo de las distintas actividades.

Las condiciones de transporte dificultan el acceso a insumos agrícolas hasta las fincas, ya que para llegar a algunas es necesario caminar hasta dos horas por camino de herradura, adicional al tiempo en automóvil desde la cabecera municipal hasta la vereda, estas condiciones favorecen que los productores se resignen a recibir por la venta del cacao lo que el intermediario del centro de acopio esté dispuesto a pagar con tal de no regresar nuevamente con la carga y aprovechar para mercar cuando está en el pueblo.

Adentrándose a los resultados de las fincas en Chaparral (Tabla 70) se abstrae que:

De las 10 fincas muestreadas solo la mitad tienen baja (inferior a 0,5) productividad del suelo, este pobre resultado en C1, C2, C3, C4 y C9 obedece principalmente a un pobre desempeño de la variable Química de suelos, la misma está estrechamente relacionada con el manejo del cultivo, específicamente fertilización.

A lo anterior se suma que en términos generales, las plantaciones de cacao muestreadas no se encuentran establecidas en suelos con alta aptitud física para el cultivo de cacao, con excepción de la finca C10 y en menor medida la C6 que tienen puntuaciones superiores a 0,6 en la variable Física. Mientras C8 se encuentra establecido en una zona con baja (0,364) aptitud física para cacao.

Aunque la finca C5 tiene aptitud potencial para producción de cacao, ya que su productividad del suelo es la más alta y alcanza el 0,671, su mayor deficiencia se refiere a las condiciones del Cultivo, específicamente lo que tiene que ver a nivel de Sistema, esto es, Tecnología, Podas y Sombrío.

En términos de las condiciones de Cultivo C1, C2, C6, C8 y C10 consiguieron superar el valor de 0,5, no obstante, son puntuaciones aceptables. La mayor falencia se presenta a nivel de Sistema, esto se explica probablemente en el hecho que el cultivo de cacao generalmente se aprovecha pero no se invierte en él a escala comercial, por lo cual el nivel tecnológico generalmente es bajo.

Tabla 70 Resultados intermedios Subsistema Suelo-Cultivo de las fincas de Chaparral

Finca	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Productividad del Suelo	0,46	0,451	0,467	0,449	0,671	0,665	0,594	0,473	0,433	0,672
Química	0,459	0,41	0,467	0,374	0,773	0,7	0,651	0,547	0,421	0,666
Física	0,462	0,513	0,468	0,561	0,518	0,613	0,507	0,364	0,45	0,682
Cultivo	0,513	0,55	0,431	0,236	0,448	0,572	0,48	0,509	0,305	0,513
Árbol	0,655	0,624	0,535	0,297	0,486	0,641	0,465	0,514	0,257	0,506
Sistema	0,248	0,413	0,238	0,123	0,376	0,443	0,506	0,499	0,392	0,527

Adicionalmente, fincas como C4 y C9 presentaron puntuaciones inferiores a 0,3 para las condiciones a nivel de Árbol, es decir, que el estado productivo de los árboles muestreados era limitado así como su estado nutricional, sumado a la presencia de plagas y enfermedades de impacto económico. Vale la pena resaltar que en ambas fincas el material vegetal es de tipo criollo, por lo tanto, son más susceptibles a sufrir por plagas y enfermedades como *Phytophthora* y *Moniliasis* que efectivamente estaban presentes en dichas fincas.

Durante la visita del agrónomo a C9 se observó que suelo del lote de cacao estaba encharcado, condición que favorece la propagación de *Phytophthora*. En C4, el Sombrío y las Podas no fueron valoradas como apropiadas para el cultivo del cacao porque habían muchos árboles de sombra y árboles de cacao con altura mayor a los 4 metros, lo que estimula el desarrollo del hongo *Moniliasis* (Instituto Colombiano Agropecuario, 2012).

Dado que C4 y C9 están localizadas en una zona con baja densidad poblacional y a una distancia de más de una hora y media por sendero a través de montaña, hasta la carretera más cercana, y una hora adicional por camino asfaltado hasta el pueblo, la disponibilidad y movilidad de mano de obra es reducida, por lo tanto, la mano de obra para ejecutar las labores del cultivo es limitada. En ambos casos las labores del cultivo, que incluye el control manual de plagas, está a cargo de sólo una persona.

En el caso de la finca C4, además debe tenerse en cuenta que el productor, que es quien realiza las labores del cultivo, tenía 75 años al momento de la recolección de la información, eso explica que esta finca tenga el manejo del cultivo más deficiente de la muestra, principalmente lo que respecta a nivel de Sistema. Con relación a la Productividad del Suelo la variable más limitante fue la Química que solo puntuó 0,374.

Las condiciones de transporte (distancia, material de la vía y tiempo) para llegar a C4 y C9 dificultan el acceso a insumos, la asistencia técnica y la comercialización del producto.

C1, presentó un pH (7.5) más básico de lo óptimo para cacao, el productor confirmó que aplica Cal aun sin saber si el suelo de su parcela lo requiere, esto se debe a qué es el insumo al que más frecuentemente tienen acceso a través de donaciones estatales todos los agricultores, indistintamente del cultivo, esto lejos de contribuir a mejorar las condiciones productivas de la plantación de cacao lo que hace es limitarla aún más. Esta finca también cuenta con un alto contenido de Cd (tres veces el contenido permitido), estas condiciones influyen negativamente en la Productividad del suelo para la producción de cacao.

No obstante, C1 tiene el mejor desempeño en Árbol (0.655), probablemente como resultado del nivel de experticia y capacitación del productor, quien ha desempeñado el rol de asistente técnico de Fedecacao.

En la Tabla 71 se presentan los resultados de las fincas de Mariquita, zona donde los productores fertilizan con mayor frecuencia, paradójicamente se halló que los productores más comprometidos con la fertilización reportaron los valores más bajos en el equilibrio de Macronutrientes (M1, M4, M7, M8 y M10), probablemente esto se deba a que las dosis en que ellos suministran los insumos al suelo no se basa en relaciones de equilibrio entre los elementos mayores sino a partir de umbrales estándar establecidos para cada elemento de manera independiente, lo que altera negativamente el equilibrio natural del suelo para Cacao.

Tabla 71 Resultados intermedios Subsistema Suelo-Cultivo de las fincas de Mariquita

Finca	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Productividad del Suelo	0,433	0,523	0,457	0,38	0,472	0,505	0,263	0,502	0,509	0,586
Química	0,48	0,598	0,433	0,482	0,492	0,681	0,297	0,621	0,524	0,6
Física	0,362	0,411	0,492	0,227	0,443	0,242	0,212	0,324	0,487	0,565
Cultivo	0,689	0,455	0,547	0,771	0,371	0,361	0,784	0,572	0,657	0,755
Árbol	0,724	0,461	0,564	0,825	0,429	0,422	0,784	0,638	0,636	0,784
Sistema	0,623	0,444	0,515	0,670	0,264	0,248	0,784	0,451	0,694	0,701

Además la toma de decisiones respecto a fertilización se basa en recomendaciones de los asesores de las casas comerciales que venden los insumos y no en los resultados de análisis de suelos actualizados. Demostrando que no solo el dinero a invertir es suficiente sino que se requiere de conocimiento experto.

M7 demuestra que el manejo agronómico correcto no garantiza un índice Suelo-Cultivo alto. En esa finca, las prácticas culturales corresponden con lo sugerido por los expertos, la plantación estaba sana, con buena sombra y podas. A pesar de esto, los resultados del análisis del laboratorio de suelos mostraron que la productividad del suelo no era lo suficientemente adecuada para el cacao, lo que limita el rendimiento agrícola del cultivo.

En M10 la mayor restricción corresponde a Física del suelo, específicamente porque algunas variables (densidad aparente, humedad y porosidad) tuvieron un grado de satisfacción Bajo en comparación con los valores óptimos. Además, durante la recopilación de datos, se identificó que *Phytophthora* afectaba el valor específico del cultivo (sanidad vegetal) y también que el pH del suelo era el elemento más limitante en la variable química. Sin embargo, la finca tenía buenas propiedades en Química porque la fertilización se realiza correctamente. Su mayor fortaleza está en el manejo del cultivo (a nivel de Árbol y Sistema) debido a que el agricultor contrata mano de obra especializada y exclusiva para trabajar en el cacao.

En la Tabla 72 se presentan los resultados de las variables agregadas intermedias del subsistema Suelo-cultivo para las fincas localizadas en Ortega. En términos generales se halló que las condiciones del Cultivo eran más favorables que las de Productividad del suelo en esta zona, con excepción de O5 y O6 donde sucede lo contrario.

Los resultados en Química de O10 y de Árbol en O6 fueron preocupantemente bajos, por lo que se esperaba que los productores de estas fincas adopten estrategias para resarcir las condiciones actuales.

O10 llamó la atención por sus niveles atípicos de Cd, indagando por posibles causas de tal resultado se halló que recientemente sobre el borde de la parcela de cacao fue pavimentada la carretera de la vereda, lo que ha sido señalado por (Mite et al., 2010) como una posible causa debido al uso de derivados del petróleo.

Además O10, al igual que la finca O9, presentó un contenido de Materia Orgánica bajo (entre 1 y 3%), lo mismo ocurrió con el pH, arrojando cero como grado de satisfacción en ambas variables, que aportan significativamente a la variable Química.

Tabla 72 Resultados intermedios Subsistema Suelo-Cultivo de las fincas de Ortega

Finca	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10
Productividad	0,409	0,496	0,376	0,467	0,593	0,6	0,544	0,367	0,375	0,25

del Suelo										
Química	0,436	0,328	0,288	0,468	0,603	0,819	0,529	0,28	0,302	0,05
Física	0,368	0,748	0,508	0,466	0,577	0,272	0,566	0,497	0,486	0,549
Cultivo	0,608	0,566	0,576	0,625	0,340	0,256	0,671	0,591	0,708	0,615
Árbol	0,627	0,651	0,568	0,599	0,347	0,160	0,731	0,640	0,778	0,673
Sistema	0,572	0,408	0,593	0,672	0,328	0,434	0,559	0,499	0,577	0,508

O2 es una finca muy productiva pese a que el cultivo de cacao tiene más de 45 años, el agricultor señaló que nunca ha fertilizado. Con el índice propuesto, es posible resaltar que el mayor potencial de esta finca se debe a las propiedades de Física del suelo que la hacen muy apta para el cacao (0,748). Sin embargo, la variable Química fue baja (0,328) porque la Materia Orgánica y el pH no son satisfactorios, lo que era de esperar por la falta de fertilización. Como el Índice del subsistema Suelo-Cultivo no depende solo de la cantidad de producción sino del equilibrio entre las condiciones del suelo y del cultivo, en esta finca este alcanzó un puntaje de apenas 0,513.

Los resultados de las propiedades Física del suelo evidencian que Chaparral (6 de 10 tienen puntaje Mayor a 0,5) y Ortega (5 de 10 tienen puntaje Mayor a 0,5) tienen mejores condiciones que Mariquita (solo M10 tiene puntaje Mayor a 0,5) para producir cacao. Esto muestra que la zona sur del Tolima tiene menos restricciones de suelo que la zona norte.

Sin embargo, la Física del suelo es una condición necesaria para tener éxito en la producción de cacao porque no cambia en el corto plazo, sin embargo no es suficiente para tal fin, como se demuestra al comparar las granjas O10 y M10. Ambas fincas tienen propiedades Física similares y adecuadas, pero tuvieron una diferencia de 0,17 en el índice Suelo-cultivo que puede explicarse por la variable Química (fuertemente vinculada al manejo del cultivo).

El caso opuesto es O6, que tenía condiciones químicas óptimas del suelo, incluso sin fertilización, pero tenía un manejo agronómico de cacao inadecuado, evitando que el índice de subsistema Suelo-cultivo fuera mayor.

Cuando se muestrearon los suelos en las 30 fincas se observó que los suelos de Mariquita son más orgánicos que los de Chaparral y Ortega, esto se confirmó con el análisis de laboratorio de propiedades químicas, solo M7 y M9 presentaron bajo grado de satisfacción en Materia Orgánica que es la segunda variable con mayor peso en la variable Química del suelo. Sin embargo, para el pH, las fincas de Mariquita tienen niveles menos adecuados que las de Chaparral y Ortega para el cacao.

En general, el Cd se encontró en una cantidad inferior al límite definido por (U.S. Environmental Protection Agency, 1996) excepto en cuatro granjas: C1, C2, C4 y O10. Una posible explicación para el último caso, según las posibles fuentes de contaminación señaladas por (Mite et al., 2010) podría ser el secado del cacao en el pavimento de la vía o la alta acidez del suelo de la plantación que estimula la acumulación Cd. Los resultados confirmaron lo expresado por los productores previo al levantamiento de información, de las tres zonas estudiadas Chaparral es la más amenazada por este metal pesado.

Tanto la calidad del suelo como el material de siembra (variedades de árboles de cacao Criollo) pueden explicar que los cultivos tradicionales de Chaparral tengan un rendimiento similar a los cultivos de Mariquita aun cuando estos últimos son más tecnificados.

4.2. Prioridades a Nivel del Subsistema Socioeconómico

Para identificar los aspectos prioritarios a trabajar en cada finca se procedió a revisar los resultados de las variables de la Fase 4 y 5 que son a partir de las cuales se calculó el indicador final Socioeconómico. En el caso de Chaparral los resultados se presentan en la Tabla 73.

Comparando los indicadores de la Fase 5, para las fincas de Chaparral, se halló que el promedio más bajo en la zona se presentó para el Económico (0,408), seguido del de Gestión y Administración (0,442), y el más alto fue el Social (0,552).

La finca C4 fue la única con el indicador Social Bajo, mientras que en C8 y C9 fue Medio Bajo, en C3 y C10 fue Medio, en C5, C6 y C7 fue Medio Alto y C2 fue la única con un indicador Social Alto.

Se resalta que en siete de las nueve fincas reportadas el indicador de Servicios Básicos es menor o igual que 0,35, lo que resulta preocupante si se tiene en cuenta que estos se refieren principalmente al acceso a Agua, Saneamiento y Energía adecuados en términos de salud humana y para el ambiente. Sólo en el caso de C2 y C3 este indicador resultó ser Medio Alto. Servicios Básicos resultó ser el mayor limitante del indicador Social en las fincas C2, C3, C5, C6 y C7.

El indicador de Salud fue Medio Bajo en las fincas C3, C4, C8, fue Alto en las fincas C2 y C7, Medio Alto en la finca C9 y Muy Alto en C6 y C10. Si bien es positivo que la

mayoría cuenta con acceso al servicio de salud se resalta que las condiciones de los mismos no son óptimas ya que en promedio los responsables de la unidad productiva tenían más de 55 años al momento de la encuesta.

El indicador Educación, fue Bajo en C4 y C10, Medio Bajo el C9, Medio Alto en C8, Alto en C2 C3, C5 y C6 y Muy Alto en C7. Ese indicador se eleva principalmente en fincas donde hay menores de 30 años como consecuencia de la estrategia mundial enfocada en aumentar la cobertura en educación, que en Colombia se materializó con la declaración en la Constitución Política de 1991 de la educación como derecho.

Tabla 73 Resultados intermedios del Subsistema Socioeconómico en Chaparral

Finca	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Social	0,728	0,588	0,256	0,687	0,672	0,684	0,444	0,431	0,530
Servicios Básicos	0,625	0,625	0,225	0,350	0,225	0,350	0,350	0,350	0,350
Salud	0,785	0,367	0,425	0,925	1,000	0,703	0,319	0,597	1,000
Educación	0,773	0,780	0,113	0,780	0,780	1,000	0,667	0,340	0,227
Económico	0,288	0,582	0,387	0,412	0,491	0,353	0,423	0,311	0,430
Financiero	0,099	0,733	0,398	0,572	0,458	0,050	0,350	0,207	0,217
Empleo	0,400	0,600	0,600	0,375	0,533	0,5	0,5	0,501	0,525
Comercialización	0,371	0,407	0,163	0,284	0,484	0,518	0,420	0,221	0,554
Gestión y Administración	0,194	0,487	0,574	0,334	0,327	0,520	0,603	0,298	0,637
Perfil del Responsable	0,378	0,850	0,431	0,400	0,233	0,850	0,900	0,585	1,000
Gestión Ambiental	0,200	0,400	0,875	0,000	0,750	0,000	0,000	0,000	0,200
Relacionamiento institucional	0,000	0,200	0,420	0,600	0,000	0,700	0,900	0,300	0,700

Respecto a la variable Financiero, el resultado Muy Bajo en C2 se explica por la dependencia de una sola fuente de ingresos (ventas agropecuarias aunque la actividad principal es ganadería), los Bajos ingresos obtenidos por el cacao, la incapacidad de los ingresos totales para cubrir los gastos del hogar y el material de la vivienda. En cuanto a la variable Empleo el productor no posee la experiencia suficiente y tiene poco sentido de pertenencia por el cultivo de cacao (incluso ha eliminado parte del inventario de árboles que habían cuando llegó a la finca para reemplazarlos por pastos para ganadería), entonces contrata MOE para realizar las labores, y considera que ésta es fácil de conseguir en la zona aunque con cada vez menos interés por parte de la población menor de 30 años.

El caso de C3 resulta es especial en el aspecto Financiero por que el nivel de escolaridad de uno de varios de los miembros del hogar es superior y uno de ellos se ubica laboralmente en el sector educativo, contribuyendo positivamente a la renta familiar en términos de cantidad y de diversidad de fuentes, luego en la variable Financiero está finca tuvo una valoración Alta. Respecto al Empleo se clasifica en Medio Alta principalmente porque el 75% de la MOF se ocupa en la finca y adicional cuenta con disponibilidad para contratar MOE, sin embargo, considera que el relevo generacional en la zona es Muy Bajo.

C4 en el aspecto Financiero tuvo una puntuación Medio Baja que podría ser peor si no fuera porque el productor cuenta con una subvención económica estatal, por hacer parte de la tercera edad, recursos con los que se ayuda para soportar los gastos de la finca. Un factor limitante de este productor es que vive solo en la finca, por lo cual se encarga él de realizar todas las actividades en los diferentes cultivos, eventualmente hijos y esposa le visitan y le colabora, porque a pesar de contar con disponibilidad de mano de obra en la zona no tiene recursos monetarios para contratarla.

La calificación Medio Alta de C5 en Financiero puede ser explicada por el material de la Vivienda, la diversidad de fuentes que ingresos que alcanzan para más que sólo cubrir los gastos del hogar, sin embargo la limitante en este aspecto es el monto de ingresos obtenidos a partir del cacao. En cuanto a la variable Empleo en esta finca todas las labores son realizadas por los miembros del hogar, ya que es difícil conseguir mano de obra en la zona. Si bien la percepción del productor respecto al relevo generacional es que en la zona es Bajo, en esta finca llama la atención que la hija de 19 años y el hijo de 15 años trabajan en la finca en un pedazo de lote que ha sido demarcado por el productor para que sus hijos lo administren y obtengan ingresos.

En la variable Económico el desempeño de C6 fue Medio, asimismo para cada una de las variables que conforman dicha variable (Financiero, Empleo y Comercialización). Desde el punto de vista Financiero destaca el Muy Bajo nivel de ingresos obtenidos por el cultivo de cacao, afortunadamente el productor cuenta con una fuente de ingresos adicional a las ventas agropecuarias para suplir sus gastos y más, el productor considera que la disponibilidad de MOE en la zona es Baja al igual que el Relevo Generacional.

C7 y C9 no tienen una fuente de ingresos adicional a las ventas agropecuarias, la renta obtenida por el cacao es Muy Baja y la renta total no alcanza para sostener los gastos del

hogar, todo eso explica su Medio Bajo desempeño en Financiero. En cuanto al Empleo ocupan toda la MOF disponible, considera Muy Bajo la disponibilidad de MOE y el relevo generacional.

El resultado en Financiero de la finca C8 la clasifica dentro Medio Bajo, esto pese al material de la Vivienda y a que cuenta con una fuente de ingresos adicional a las ventas agrícolas, los ingresos generados por el cacao son insuficientes para cubrir gastos. Si bien emplea toda la MOF disponible por completo en la finca la cantidad disponible es insuficiente para todas las labores que deben ser realizadas y la MOE en la zona es difícil de conseguir.

C10 tuvo un Bajo resultado Financiero explicado por la incapacidad del cultivo de cacao de generar, al menos, medio SMMLV, con todo y que tiene una fuente de ingresos adicional a las ventas agropecuarias su renta total no es suficiente para cubrir los gastos del hogar, ocupa casi toda su MOF dentro de la finca, considera que si hay interés de la población menor de 30 años de dar continuidad al cultivo de cacao en la zona.

Conforme se esperaba para el caso de Chaparral, por las precarias condiciones de la vía y la lejanía donde se localizan las fincas productoras de cacao, el indicador de comercialización osciló entre Bajo y Medio (Bajo en C4, C5 y C9, Medio Bajo en C2, C3 y C8 y Medio en C6, C7 y C10).

Respecto a la variable Gestión y Administración el Bajo valor de la finca C2, Medio Bajo de C5, C6 y C9, y Medio de C3 y C7 dan cuenta que de las mayores falencias que se presentan en el sistema de producción de cacao se relaciona con la manera como se administra y gestionan las eventualidades ambientales y técnicas.

C3, C7, C8 y C10 tuvieron una valoración Muy Alta en cuanto al Perfil del Responsable, explicada principalmente por los años de experiencia produciendo cacao y su Residencia en la finca, esto último les permite darse cuenta en tiempo real de cualquier inconveniente que se presente en el cultivo, toda vez que estén pendientes del mismo a diario.

En Relacionamiento Institucional C2 y C6 tuvieron un resultado Muy Bajo; C3, C4, y C9 tuvieron un resultado Bajo, mientras que C7 y C10 tuvieron resultado Alto y C8 Muy Alto. Estos resultados son preocupantes si se tiene en cuenta que Asociativismo y Asistencia Técnica son los elementos más importantes de esta variable. Sin embargo los mismos son entendibles si se tiene en la cuenta que es una zona que históricamente ha

estado marcada por el conflicto armado, haciendo que la asistencia técnica recibida por los productores sea esporádica y un tejido social deteriorado y marcado por la desconfianza que impide que la Asociatividad sea efectiva para el desarrollo de los sistemas de producción y de la cadena de cacao.

Asimismo son alarmantes los resultados frente a la Gestión Ambiental, salvo en el caso de C4 que no se ha visto afectado por Eventos Climáticos extremos y fue la única finca, de las estudiadas en esa zona, donde los residuos no son quemados sino abandonados en un lote, condición que se le facilita al tener una extensión de 100 ha.

En el caso de las fincas localizadas en Mariquita los resultados de variables agregadas intermedias se presentan en la Tabla 74.

En la variable Social las fincas de Mariquita tuvieron un promedio de 0,618, en los casos de M1, M6, M7, M8 y M9 los resultados oscilaron entre 0,60 y 0,75. M4 tuvo un resultado Medio y sólo M2 presentó resultado Medio Bajo. Esto da cuenta que en términos generales las condiciones sociales de las fincas de Mariquita son comparativamente mejores que las de Chaparral.

En el caso de los Servicios Básicos la mayor limitante para M6, M7, M8 y M9 fue la variable de entrada Agua y se explica porque su origen obedece a captación propia, por lo que no se puede garantizar su potabilidad. Mientras que en las fincas M1, M2 y M4 la mayor limitante corresponde al uso de biomasa vegetal como combustible para cocinar.

Con relación a Salud se resalta que la edad promedio de los productores de esa zona fue de más de 57 años, es decir superior a la de Chaparral. Las fincas M4 y M7 tuvieron desempeño Medio Bajo y Medio explicado principalmente por la edad del productor, 75 y 74 años respectivamente, que dificulta el desarrollo y acompañamiento de las actividades del sistema productivo.

En el caso de M2 la edad (29 años) se convirtió en una limitante porque a su corta edad los años de experiencia como productor son igualmente reducidos para conocer el funcionamiento del ciclo productivo del cacao, ya que los árboles alcanzan su pico productivo entre los 11 y 30 años. Paradójicamente M2 es el productor más joven y con la puntuación más baja en Educación.

El nivel de Escolaridad promedio de Mariquita (0,75) fue mayor que en Chaparral (0,61), para la variable Educación el resultado osciló entre 0,67 y 1,0 en 6 de las 7 fincas estudiadas, lo que refleja un nivel Alto para la zona.

La mayor limitante Social en M1 fueron las condiciones de salud. En M2 fue el nivel de Educación. En M4 fue Salud, por causa de la edad principalmente. En M6, M7, M8 y M9 fue Servicios Básicos.

Tabla 74 Resultados intermedios del Subsistema Socioeconómico en Mariquita

Finca	M1	M2	M4	M6	M7	M8	M9
Social	0,745	0,426	0,559	0,658	0,618	0,686	0,636
Servicios Básicos	0,650	0,625	0,650	0,375	0,375	0,350	0,375
Salud	0,589	0,425	0,367	0,925	0,483	0,920	0,647
Educación	1,000	0,227	0,667	0,667	1,000	0,780	0,887
Económico	0,389	0,592	0,306	0,373	0,653	0,280	0,538
Financiero	0,600	0,600	0,300	0,200	0,963	0,517	0,600
Empleo	0,000	0,695	0,17	0,400	0,400	0,000	0,600
Comercialización	0,560	0,480	0,453	0,523	0,587	0,318	0,411
Gestión y Administración	0,772	0,481	0,442	0,520	0,852	0,326	0,703
Perfil del Responsable	0,547	0,564	0,233	0,336	0,663	0,450	1,000
Gestión Ambiental	0,875	0,875	0,400	0,750	1,000	0,525	0,200
Relacionamiento institucional	0,900	0,000	0,700	0,480	0,900	0,000	0,900

En Económico M1, M4, M6 y M8 no consiguieron superar el 0,5. En el caso de M1 y M8 obedece principalmente a la variable Empleo, en M4 y M6 adicional a Empleo estuvo la variable Financiero. El valor promedio de Económico fue 0,447.

Dentro de lo Financiero la mayor preocupación obedece a que, excepto M7 y M8, las fincas de Mariquita manifestaron tener solo una fuente de ingresos monetarios. Solo en M6 los gastos monetarios exceden los ingresos del hogar. En M4, M6 y M8 los ingresos mensuales por cacao no alcanzan ni siquiera el equivalente a medio SMMLV.

Con relación al Empleo M1, M4 y M8 carecen de disponibilidad para encontrar MOE en la zona. Con excepción de M2, las demás fincas consideran Bajo el interés de la población menor de 30 años por trabajar en el cultivo de cacao.

Pese a la limitada infraestructura logística para la comercialización del cacao en Mariquita las condiciones de transporte son mejores que en Chaparral y Ortega, asimismo hay menor brecha entre el precio de equilibrio y el precio de venta del grano, sin embargo la generación de valor agregado en todas las fincas analizadas era nula, razones por las que el promedio de la zona en Comercialización puede ser clasificado como Medio (0,476).

En Gestión y Administración el promedio fue de 0,585. Se resalta que en general durante las visitas se observó mayor organización en el manejo de registros y para el desarrollo de actividades dentro del sistema de producción, se destaca principalmente el modelo de gerencia de M7.

En la variable Perfil del Responsable, los años de Experiencia como productor de cacao están asociados al tiempo trabajando en el cultivo propio o ajeno pero también con la edad del productor, pues a mayor cantidad de años de vida mayor probabilidad de haber trabajado en cacao, de manera que en los cultivos administrados por población joven esta variable puede jugar en su contra, asimismo pasa con Dedicación (principalmente en inversión de tiempo capacitándose).

Las condiciones de las vías facilitan que las fincas a borde de carretera reciban Asistencia Técnica por parte de la Alcaldía y Fedecacao, sin embargo, en el caso de M2, M4 y M8 esta se considera de Baja calidad. En la zona se evidenció trabajo articulado entre los productores, lo que contribuye al crecimiento de las unidades de producción, dentro de los logros conjuntos se destaca la instalación de la primera planta procesadora de cacao en el municipio, asimismo se resalta que la mayoría de los encuestados (M1, M4, M7 y M9) participa, confía y respalda el trabajo de la asociación a la que pertenecen.

La variable más limitante del índice Socioeconómico en Mariquita fue Económico, seguida de Gestión y Administración.

Finalmente en la Tabla 75 están los resultados de las variables generadas para calcular el índice Socioeconómico en Ortega. A partir de la misma se calculó el valor promedio de la variable Social (0,442), siendo el más bajo de las tres zonas, lo que da cuenta de las precarias condiciones en que viven los productores de cacao encuestados, principalmente en términos de Servicios Básicos porque exceptuando O8 todas las demás fincas tuvieron una valoración Baja o Medio Baja. A diferencia de las demás zonas en Ortega predomina el

uso de leña para cocinar, lo que además de implicar tala de árboles provoca contaminación ambiental y consecuentemente deterioro de la salud humana.

Tabla 75 Resultados intermedios del Subsistema Socioeconómico en Ortega

Finca	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10
Social	0,275	0,257	0,570	0,533	0,525	0,224	0,414	0,289	0,687	0,650
Servicios Básicos	0,350	0,225	0,350	0,225	0,225	0,350	0,300	0,625	0,350	0,350
Salud	0,250	0,000	0,367	0,600	0,355	0,319	0,925	0,244	0,925	0,925
Educación	0,227	0,553	1,000	0,773	1,000	0,000	0,000	0,000	0,780	0,667
Económico	0,381	0,489	0,473	0,458	0,527	0,427	0,399	0,417	0,629	0,530
Financiero	0,300	0,502	0,800	0,493	0,435	0,350	0,350	0,217	0,572	0,572
Empleo	0,533	0,567	0,167	0,413	0,500	0,517	0,500	0,500	0,733	0,500
Comercialización	0,313	0,398	0,444	0,468	0,648	0,416	0,350	0,541	0,583	0,518
Gestión y Administración	0,586	0,677	0,457	0,659	0,544	0,554	0,228	0,426	0,660	0,221
Perfil del Responsable	0,850	0,900	0,372	0,580	0,800	0,950	0,475	0,550	0,727	0,457
Gestión Ambiental	0,000	0,525	0,400	0,400	0,525	0,400	0,200	0,125	0,350	0,200
Relacionamiento institucional	0,900	0,600	0,600	1,000	0,300	0,300	0,000	0,600	0,900	0,000

Asimismo en esta zona predomina el consumo de agua de fuente propia, es decir que *per se* no se puede garantizar su potabilidad.

En cuanto al nivel de Educación preocupa la situación de las fincas O1, O6, O7 y O8, que en la primera de ellas es Bajo pero en las tres restantes es Muy Bajo. Respecto a Salud O1 y O2 no cuentan con afiliación de ningún tipo para recibir ese servicio, además O2, O3, O4, O5, O6 y O8 superan la edad de los 60 años lo que puede limitar el desarrollo de las labores de campo.

Desde el punto de vista de la variable Económico, la variable Financiero fue la principal limitante para la mayoría de las fincas (O1, O5, O6, O7, O8 y O9). Mientras que Empleo fue la mayor limitante de O3, O4 y O10, y Comercialización de O2. El promedio de la zona en Económico fue de 0,473, superior al de Chaparral o Mariquita.

Dentro de los elementos que integran a Financiero se resalta que en la zona, con excepción de O1, las fincas tienen una fuente de ingresos adicional a las ventas agropecuarias, muy contrario a lo que sucede en Mariquita. Asimismo, el material

predominante de la Vivienda de apenas dos fincas (O2 y O8) fue valorado como Bajo, en las restantes fue Alto o Muy Alto.

La mayor limitante en la variable Empleo corresponde a la percepción de Relevancia generacional en el sistema productivo de cacao, en cuanto a la ocupación de MOF únicamente en O3 y O4 no es Muy Alta. Respecto a la disponibilidad de MOE en O9 fue Muy Alta, en O4 Alta y en O2 Medio Alta, el demás fincas fue Baja o Muy Baja.

En cuanto a Comercialización se destaca las iniciativas de transformación artesanal elaboradas por O3 y O4, específicamente para elaborar chocolate de mesa o un producto ancestral denominado chucula. Las demás fincas venden el cacao en grano seco.

Frente a la percepción de la brecha entre el precio de venta y el de equilibrio, se halló que la menor proporción entre ambos precios se presentó en Ortega (0,79) y Chaparral (0,84), en comparación con Mariquita (0,93), donde efectivamente el precio medio al que venden los productores es mayor porque la comercialización se realiza en Fresno, un municipio sobre la vía hacia Manizales, donde hay una planta de transformación de cacao en chocolate del grupo Nutressa, y por tanto reduce el grado de intermediación.

Al igual que en Mariquita y Chaparral, el indicador promedio de Transporte en Ortega fue Medio Bajo, lo que confirma las dificultades estructurales que enfrentan los productores de cacao para llevar a cabo la venta del grano así como llevar hasta la finca insumos que el cultivo requiere en grandes cantidades.

En el componente de Gestión y Administración el promedio de Ortega fue 0,501. El Estrés Hídrico es una problemática generalizada en la zona ya que el cultivo de cacao sufre por falta de agua en las fincas analizadas, exceptuando O9. Es decir que una de las falencias de estos sistemas de producción obedece a la ausencia de un sistema de riego, lo que evidentemente se ve reflejado en las condiciones del Suelo-Cultivo.

Las únicas fincas con un desempeño Bajo en Gestión y Administración fueron O7 y O10, explicados principalmente por el nulo resultado en la variable Relacionamento Institucional, que a su vez dependió del nulo desempeño en sus variables de entrada (Asociativismo, Asistencia Técnica y Certificación). Asimismo en Gestión Ambiental tuvieron cada uno 0,2 como puntuación debido a que el cultivo sufre por Estrés Hídrico, entre 2016 y 2019 más de tres Eventos Climáticos les habían perjudicado y la eliminación de Residuos sólidos la hacen a través de quemas.

O8 tuvo un comportamiento similar en cuanto a Gestión Ambiental con la diferencia que la eliminación de Residuos la realiza abandonándolos en un lote baldío en lugar de quemarlos. Por el lado de Relacionamento Institucional se identificó falencia en cuanto a la variable Asociativismo (no participa) y no cuenta con algún tipo de Certificación, por el lado del Perfil del Responsable es de las pocas fincas, junto a O3 y O7, donde el responsable reside fuera de la finca, todo lo anterior explica que su resultado de Gestión y Administración sea Medio Bajo.

En el caso de las fincas O3, O5 y O6 la variable Gestión y Administración tuvo un resultado Medio, en el caso de O3 la principal debilidad está en Perfil del Responsable ya que su dedicación al cultivo es limitada y los años de experiencia como productor de cacao son relativamente pocos para conocer todo lo que involucra el ciclo productivo del mismo. En el caso de O5 la principal falla está en Relacionamento Institucional, específicamente con el Asociativismo y la Certificación.

De las fincas con información socioeconómica disponible la única que cuenta con Certificación en Buenas Prácticas Agrícolas es O4. Eso explica su Muy Alto desempeño en Relacionamento Institucional. En Perfil del Responsable el único limitante de esa finca fue la Experiencia como productora de cacao porque lleva menos de 15 años. Y en Gestión Ambiental el cultivo sufre de Estrés Hídrico y los Residuos sólidos se queman.

En los casos de O1, O2 y O9 el resultado de Gestión y Administración fue Medio Alto. En el caso de O1 las limitantes se focalizan principalmente en todos los aspectos considerados dentro de la Gestión Ambiental; en el caso de O2 el punto crítico está en Asociatividad; y en O9 los elementos clave a mejorar corresponden a la gestión de Eventos Climáticos y la manera como se eliminan los Residuos.

4.3. Prioridades a Nivel del Subsistema Calidad de Cacao

Los resultados de las variables agregadas que pertenecen a las Fases 4 y 5, para cada zona se presentan en Tabla 76, Tabla 77 y Tabla 78. A continuación se describen y resaltan aspectos claves de cada zona y cada finca para ayudar a comprender los resultados matemáticos.

Los resultados de Calidad Sensorial estuvieron por encima de 0,6 en siete de las diez fincas en Chaparral, en cinco de las diez en Ortega y en Mariquita solo dos de las diez,

reflejando el potencial del cacao producido en el sur del Tolima para hacer parte del mercado de cacao fino y de aroma, como era de esperar porque en esa zona predomina el cacao CCN51 mientras que en el Chaparral aún prevalecen los híbridos de cacaos criollos.

De las variables agregadas pertenecientes a la Fase 5 (Ver Figura 9) la calidad Fisicoquímica resultó ser la mayor limitante en las tres zonas, incluso de las treinta fincas analizadas únicamente C5 consiguió superar el umbral de 0,5. Entre la Física y la Química del grano, predominó la restricción impuesta por la variable Física que con excepción de O4 y M9 estuvo por debajo de 0,4, esto significa que la salubridad y la fermentación del cacao en las fincas analizadas distan de ser las adecuadas según los parámetros definidos por la NTC 1252, por tanto las entidades de investigación orientadas en fortalecer la estructura productiva de las fincas debe hacer énfasis en ese aspecto.

Las puntuaciones promedio del índice de Prácticas de Beneficio fueron: 0,485 para Chaparral, 0,516 para Ortega y 0,462 para Mariquita, reflejando un mejor conocimiento de las actividades de cosecha y pos cosecha por parte de los productores de Ortega, tanto así que en ocho de las diez fincas este indicador osciló fue igual o mayor que 0,5.

En Chaparral (Ver Tabla 76) se destaca C5 por ser el mayor de su zona, este resultado es explicado principalmente por la Calidad Sensorial del licor (0,636), dentro de los descriptores destacados por los catadores está: “Notas lácteas, almendradas, frutos rojos, plátano, frutos amarillos (maracuyá), especiado de canela”. Lo anterior pese a tener una relativamente baja Calidad Fisicoquímica del grano (0,522) que obedecen principalmente a deficiencias en las condiciones físicas del grano (0,363).

Tabla 76 Resultados intermedios del Subsistema Calidad de Cacao en Chaparral

Finca	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Calidad Fisicoquímica	0,333	0,236	0,366	0,117	0,522	0,463	0,378	0,384	0,285	0,298
Física	0,159	0,145	0,152	0,152	0,363	0,299	0,148	0,143	0,043	0,157
Química	0,614	0,240	0,780	0,024	0,927	0,856	0,841	0,902	0,802	0,470
Calidad Sensorial	0,621	0,450	0,605	0,621	0,636	0,386	0,618	0,614	0,613	0,418
Aromas	0,504	0,070	0,450	0,467	0,558	0,018	0,479	0,485	0,490	0,061
Básicos	0,620	0,450	0,550	0,732	0,586	0,593	0,586	0,550	0,530	0,571
Defectos	0,799	0,767	0,779	0,785	0,835	0,504	0,808	0,798	0,800	0,543
Prácticas de Beneficio	0,528	0,487	0,473	0,391	0,536	0,358	0,407	0,527	0,491	0,650
Cosecha	0,450	0,300	0,300	0,300	0,300	0,000	0,000	0,300	0,000	0,487
Pos cosecha	0,469	0,470	0,438	0,263	0,581	0,512	0,581	0,561	0,701	0,755

De C1 se resalta el peso de los granos producidos, resultado de las practicas agronómicas en el cultivo, sin embargo, la presencia de granos Germinados, Mohosos y Múltiples, asimismo el contenido de Cd, afectan negativamente la calidad Fisicoquímica, resultado de falencias en las Prácticas de Beneficio como la inadecuada recolección de frutos, tanto por la frecuencia como por la clasificación, la frecuencia de los volteos y el lugar donde se realiza la fermentación, y la clasificación de los granos para el Almacenamiento. No obstante, la calidad del licor presentó señales de sabores finos y aromas, como “Notas florales asociadas a rosas, frutos secos tipo almendra y frutales asociados a frutos rojos y plátano. Acidez cítrica, sabor residual lácteo”.

En los casos de C2, C4 y C10 la mayor limitante corresponde a la Calidad Fisicoquímica, ya que de los tres indicadores que definen la calidad global en el fisicoquímico obtuvieron la menor puntuación (inferior a 0,3 en los tres casos).

C4 llama la atención por su baja puntuación en la variable Química debido principalmente al alto contenido de Cd en el grano lo que afecta sus propiedades organolépticas además de restringir la comercialización de su producción en mercados que tengan como destino la Unión Europea. Asimismo, durante la evaluación sensorial los jueces indicaron “Notas frutales de banano, frutos rojos (cereza y mora), frutos secos tipo almendras, notas lácteas, breva. Acidez acética.”, es decir que aunque tiene potencial de Aromas las fallas en la fermentación y el almacenamiento opacan dicha fortaleza.

C2 Y C6 tuvieron las calificaciones más bajas de la zona en formación de Aromas, en el caso de C2 esto puede ir de la mano de la baja calidad Fisicoquímica, aunque no sea la peor de la zona el reporte del análisis sensorial emitido por los catadores solo percibieron “Muestra con notas con alta acidez tipo acética”. En el caso de C6 la baja puntuación en Aromas puede deberse a las Prácticas de Beneficio que fueron las más bajas de la zona, fundamentalmente en cosecha, los catadores percibieron “Alto olor y sabor a moho, presenta rancidez, acidez tipo acética, terroso”.

En la finca C3 está la familia con mayor nivel de escolaridad de las 10 fincas analizadas en Chaparral, trabajan padre y dos hijos en la finca (para todos los cultivos que tiene) pese a esas características fallan en la ejecución de las Prácticas de cosecha y la pos cosecha, eso

se refleja en la acidez acética presente en el licor de su cacao, aunque cuenta con Aromas y sabores con “notas asociadas a descriptores de almendra, frutos rojos y plátano”.

La finca C7 presentó un contenido de pasilla, esto es, granos vacíos, por encima del umbral apto para un cacao considerado con buena calidad Fisicoquímica. Conforme el indicador de Prácticas de Beneficio puede concluirse que la fermentación, el secado y el almacenamiento aunque no son óptimos no comprometen la formación de sabores y aromas, ya que dentro de la descripción hecha por los catadores está “Frutal de plátano, frutos rojos, notas lácteas, especiado de canela, frutos secos tipo almendra”. Sin embargo, la mayor falencia del productor ocurre en el proceso de cosecha.

Los resultados de la finca C8 son próximos a los de C7, lo que tiene sentido porque son productores similares en el sentido de su dedicación de tiempo, interés por capacitarse y experimentar en el manejo del cultivo y las prácticas de beneficio, además su localización, área y cantidad de árboles en producción son similares, sin embargo los árboles de C8 son más antiguos, conservando material vegetal híbrido producto de injertar los criollos de su finca con clones de mayor rendimiento agronómico. Dentro de las falencias de este productor está el almacenamiento debido a que en la misma finca se produce panela y el olor a humo es absorbido por los granos, conduciendo a que en el análisis sensorial se resalte además de los sabores a “Frutal cítrico, plátano, notas lácteas” el sabor “de pan horneado”.

El productor de la finca C9 tiene material vegetal de excelentes características pero propenso a enfermedades como moniliasis y plagas como la escoba de bruja y phitoftora, que terminan alterando la calidad del grano producido principalmente porque el productor no separa las mazorcas enfermas de las sanas en el momento de la cosecha, pese a eso dentro de los descriptores de sabor señalaron “Frutal tipo plátano, frutos rojos, frutos secos tipo almendra, nota láctea, Floral asociado a Rosa, Caramelo, Canela”.

C10 llamó la atención porque tuvo una calidad Fisicoquímica baja (0,298), que a su vez se refleja en una baja calidad Sensorial del licor (0,418), esto a pesar de tener unas buenas Prácticas de Beneficio (0,755), según lo que informó el productor, lo que sugiere que el productor conoce cuales son las prácticas de beneficio adecuadas pero falla en su ejecución. Dentro de los sabores percibidos en la cata por expertos se destacó: “Notas Rancio, terroso, sobrefermentado, tabacal, sensación picante”.

En términos generales las fincas de Chaparral mostraron tener potencial para la producción de cacaos finos y de aroma, ya que el indicador de calidad sensorial estuvo por encima del 0,6 en siete de las diez fincas a pesar de los pobres resultados en la calidad Fisicoquímica, posiblemente esto se asocie a un desconocimiento y falencias en la ejecución de las prácticas de beneficio correctas.

Dentro de las inadecuadas prácticas de beneficio que se destacan en las fincas visitadas, y que son modal en la zona, pero que perjudican la calidad final del producto están:

- No clasificación de cosecha por variedades, falencia que incide en que no se fermenten adecuadamente todos los granos cosechados ya que la cantidad de días necesarios puede ser diferente según la variedad, el ejemplo más destacado es la variedad CCN 51 que requiere más días de fermentación que los cacaos criollos.
- Mezclar las mazorcas enfermas, sobremaduras y pintonas con las mazorcas sanas y a punto de cosecha, lo que provoca alteraciones en los precursores de sabor, la salubridad de los granos (moho, ocratoxinas y ácidos grasos), granos aglomerados y con niveles más bajos de azúcar que no pueden fermentarse bien.

En Mariquita (Ver Tabla 77) M10 llama particularmente la atención, su resultado en Prácticas de Beneficio (0,940), el más alto de las treinta fincas, esto se relaciona con que este productor fermenta el CCN51 separado de las demás variedades, cuenta con casa elba para el secado, capacita al personal para separar mazorcas enfermas de las sanas así como para que se cosechen justo en el estado de maduración adecuado. No obstante, aunque cuenta con fermentadores independientes para CCN51 realiza el mismo proceso que al cacao de otras variedades por lo tanto en la prueba de corte el color de los granos y la profundidad de las estrías reflejaron fallas en la fermentación.

M1, M2 y M4 fueron las únicas fincas de esta zona que no tuvieron algo de pertenencia a la función de membresía de la variable fermentación Adecuada, esto significa que en hasta el 60% de los granos de la muestra evaluada estaban pobres de color y estrías en su interior, es decir, que conforme a este criterio dichas muestras ni siquiera alcanzan a clasificar dentro de la categoría de cacao ordinario definido por (ICONTEC, 2003).

M3 presentó un pH de 6,19 lo que en grados de satisfacción equivale a 0, esto provoca el crecimiento de mohos y a la putrefacción, incluso durante la cata del licor los expertos señalaron la presencia de notas rancias en la muestra.

Tabla 77 Resultados intermedios del Subsistema Calidad de Cacao en Mariquita

Finca	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Calidad Fisicoquímica	0,350	0,243	0,356	0,325	0,191	0,405	0,386	0,410	0,423	0,431
Física	0,114	0,086	0,346	0,163	0,187	0,224	0,202	0,283	0,418	0,320
Química	0,825	0,491	0,253	0,568	0,086	0,763	0,728	0,630	0,379	0,649
Calidad Sensorial	0,505	0,581	0,558	0,389	0,559	0,637	0,584	0,609	0,594	0,558
Aromas	0,180	0,288	0,320	0,000	0,224	0,523	0,406	0,483	0,380	0,223
Básicos	0,497	0,635	0,496	0,598	0,606	0,643	0,470	0,583	0,550	0,561
Defectos	0,706	0,774	0,730	0,601	0,769	0,835	0,779	0,774	0,794	0,799
Prácticas de Beneficio	0,497	0,532	0,295	0,570	0,449	0,461	0,518	0,178	0,338	0,786
Cosecha	0,3	0,43	0	0,3	0,3	0,43	0,3	0	0	0,5
Pos cosecha	0,493	0,493	0,421	0,660	0,383	0,315	0,542	0,254	0,482	0,940

En la prueba de corte de M5 se hallaron granos con moho, y dentro de las características que señalaron los catadores estuvo que la muestra presentaba moho además de olor y sabor terroso. Estas condiciones evidencian fallas en el proceso de secado, posiblemente obedezca a un secado prolongado o rehumidificación.

M6 deja en evidencia la importancia del material vegetal para la calidad del cacao en términos sensoriales, el indicador de Prácticas de Beneficio de ese productor refleja grandes falencias que a su vez se reflejan en la pobre Calidad Fisicoquímica, especialmente física del grano, limitando la formación de sabores Básicos y Aromas pero con una Calidad Sensorial por encima de 0,6. Incluso dentro de las observaciones hechas por los catadores está: “Muestra con notas sensoriales frutales de plátano, frutos rojos (mora). Frutos secos tipo nueces, almendras. Se encuentra una nota láctea y floral”.

En los resultados del perfil sensorial de M7 se destacó que “La muestra presentaba moho. Alta acidez (cítrica y acética). Frutales de banano, plátano y frutos secos tipo nueces” dentro de las falencias halladas en la prueba de corte estuvo el bajo porcentaje de granos con fermentación adecuada que en grados de satisfacción fue equivalente a 0,06.

M8 seca en una lona tendida sobre el piso de cemento, a la intemperie y sin algún tipo de protección frente a animales domésticos ni roedores, fermenta menos de 4 días y no realiza volteos, en el secado tampoco remueve, lo que explica la presencia de granos aglomerados por encima de lo permitido por la NTC, además los granos de la muestra evaluada presentaron signos de germinación y moho, lo que altera negativamente la calidad Física

del grano. Pese a eso en la evaluación sensorial se destacó “Sabor frutal de frutos rojos, almendra, especiado de canela”.

Conforme la coloración y la formación de estrías al interior del grano, M9 presentó la mejor calidad de la fermentación en Mariquita (0,51), aunque está lejos de lo que podría denominarse óptimo, dentro de las falencias en la cosecha se destaca la ausencia de clasificación de mazorcas conforme el estado de salubridad, además el tiempo para el desgrane reportado por el productor (8 días) favorece la proliferación de hongos ocratoxígenos lo que además de alterar la salubridad también afecta el sabor y el aroma de los granos secos. Dentro de los descriptores de sabor los expertos reconocieron “Notas de rancidez, acidez tipo acética, frutal de plátano, notas lácteas”.

En términos generales los productores de Mariquita fallan en las prácticas de cosecha principalmente por que mezclan mazorcas enfermas con mazorca sanas, lo que es entendible si se tiene en cuenta que los productores no quieren desaprovechar producción porque eso representa merma en sus ingresos además actualmente no hay un incentivo por calidad en el mercado, el precio pagado solo obedece a razones de cantidad.

En el caso de Ortega (Ver Tabla 78) como era de esperar, por el resultado del índice global de Calidad, O6 presentó una bajísima calidad Fisicoquímica a pesar que la productora manifestó realizar medianamente bien las Prácticas de Beneficio. Las condiciones de la muestra al momento de realizar la prueba de corte dieron cuenta de una inadecuada fermentación y secado porque mayoría de los granos resultaron pizarrosos (color violeta fuerte y sin estrías en su interior), almendras de tamaño pequeño y heterogéneo y con larvas de polilla en su interior.

Adicionalmente, O6, al igual que O4 y O8, evidenciaron tener una producción inadmisible en la UE porque su contenido de Cd supera los umbrales mínimos permitidos por la reglamentación europea, así lo refleja la nulidad en el indicador Química.

La toma de decisiones y las labores sobre el cultivo y de beneficio en O1 son efectuadas principalmente por una mujer que además cumple el rol de esposa y madre, esta familia migro a Ortega desde Chaparral víctima del conflicto armado, entonces las actividades agrícolas las desarrollan conforme su experiencia con Café en Chaparral. La variable Pos cosecha fue el puntaje más alto obtenido respecto al indicador de calidad, así lo demuestran los comentarios del perfil sensorial: “Frutos rojos, Floral tipo rosa, ácido acético, fique,

tabacal, almendra, frutos cítricos”. No obstante, la presencia de sabores a ácido acético y tabacal reflejan deficiencias en el almacenamiento del grano seco.

En O2, O4, O6, O7 los sabores verde y astringente se destacaron entre los descriptores encontrados, esto es señal de un cacao desagradable al gusto, ya que estas características no deberían destacar en el perfil sensorial de la muestra.

En O2 se esperaba un indicador bajo en Prácticas de Beneficio porque el productor a pesar de contar con los cajones de madera y el volumen de grano suficiente para llenarlos, prefiere seguir fermentado en baldes de plástico y utilizar el cajón de madera para guardar herramienta. Además, aunque tiene alta producción carece de mano de obra para cosecharla a tiempo por lo que muchas mazorcas se sobremaduran en el árbol.

Tabla 78 Resultados intermedios del Subsistema Calidad de Cacao en Ortega

Finca	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10
Calidad Fisicoquímica	0,348	0,372	0,273	0,288	0,294	0,094	0,275	0,220	0,283	0,283
Física	0,132	0,268	0,145	0,432	0,133	0,157	0,147	0,366	0,121	0,157
Química	0,760	0,477	0,400	0,040	0,532	0,000	0,400	0,000	0,526	0,400
Calidad Sensorial	0,609	0,573	0,607	0,613	0,575	0,371	0,453	0,663	0,617	0,506
Aromas	0,534	0,380	0,450	0,537	0,296	0,000	0,127	0,543	0,541	0,157
Básicos	0,450	0,476	0,456	0,621	0,550	0,531	0,450	0,711	0,536	0,531
Defectos	0,798	0,752	0,840	0,757	0,796	0,584	0,635	0,875	0,791	0,726
Prácticas de Beneficio	0,636	0,323	0,603	0,568	0,538	0,534	0,529	0,507	0,500	0,417
Cosecha	0,325	0,000	0,450	0,450	0,450	0,430	0,430	0,430	0,430	0,450
Pos cosecha	0,790	0,461	0,672	0,581	0,496	0,496	0,486	0,426	0,406	0,222

O3 realiza medianamente bien las prácticas de Cosecha y Pos cosecha, la Calidad Sensorial del grano que produce está por encima de 0,6 con un muy buen control de Defectos (0,84), dentro de la descripción de la muestra se resaltó “Frutos cítricos, lácteo, en olor nota acética, floral a rosa. Sabor con notas almendras, frutos rojos”.

O4 y O8 fueron las fincas que presentaron mejor calidad de fermentación en Ortega, con un grado de satisfacción de 0,57 y 0,46 respectivamente, las demás fincas presentaron grados de satisfacción menores o igual que 0,2 en la variable fermentación Adecuada.

El diferencial en la calidad de fermentación se reflejó en el perfil sensorial del cacao, en el caso de O4 destacaron “Notas en olor de nuez, maní, floral tipo rosa, canela, breva, lácteo, plátano, frutos cítricos, vegetal. En sabor bajas notas frutales y florales, verde y

astringente”; y en el caso de O8 señalaron “Nota especiada a canela, clavo, floral (Rosa), Dulce, maní, nuez, macadamia, Plátano”.

Durante la visita a O5 se halló que la fermentación se lleva a cabo en baldes plásticos, la plantación tiene problemas con Escoba de bruja y monialiasis pero no se clasifican las mazorcas enfermas de las sanas, además el grano seco es puesto en estopas sobre el piso directamente lo que provoca que el grano se rehumedezca, todas estas características inciden en la calidad fisicoquímica y sensorial. Las características señaladas por los catadores fueron “Muestra presenta notas acéticas y frutal a plátano con sensación picante”.

En la pos cosecha O7 seca al sol sobre una lona en el pavimento a borde de carretera, en el mismo lugar hay aves de corral y animales domésticos (gatos y perros) transitando constantemente, sumado a eso hay poco cuajado de mazorcas debido a deficiencia de micronutrientes en el suelo que hacen que a pesar de alta floración se inhiba el crecimiento de los granos, entonces la fermentación se hace con pocas cantidades, lo que incide sobre la evolución de las reacciones bioquímicas de formación de sabores.

O9 tuvo una buena calificación en formación de Aromas, sabores Básicos y control de Defectos, los catadores señalaron dentro de los descriptores de la muestra “Floral tipo jazmín, almendra, Breva, plátano, especiado a canela, lácteo” sin embargo, el productor debe mejorar las Prácticas de Beneficio que a su vez se reflejan en la baja calidad Fisicoquímica explicada por la alta presencia de granos insuficientemente fermentados.

Conforme el índice de calidad Suelo-Cultivo O10 tiene un suelo altamente contaminado con Cd que posiblemente se transfiere a la almendra y explica el alto contenido de ese metal en la muestra de grano analizada. Adicionalmente, la muestra de esa finca arrojó notas de sabor a combustible, reflejando inadecuadas prácticas de almacenamiento.

Con relación al contenido de Cd en grano, permitido por el mercado europeo, ocho de las 10 fincas de Ortega presentaron grados de satisfacción menores que 0,6, lo que es preocupante porque significa que en términos brutos presentaron niveles de Cd próximos a los definidos por la legislación europea. Las excepciones fueron O1 y O7 que presentaron 0,6 y 0,667 como grados de satisfacción en esa variable.

Comparando los resultados de la variable fermentación Adecuada en las tres zonas se evidenció que en Mariquita siete de las diez fincas analizadas pertenecen aunque sea un poco al conjunto difuso alto de esta variable, mientras que en los casos de Chaparral (2/10)

y Ortega (3/10) predominan la pertenencia al conjunto difuso bajo, esto resulta preocupante si se tiene en cuenta que la calidad de la fermentación es clave para obtener un grano y un licor de cacao con características de fino y aroma.

Respecto al modelo propuesto se observó que en el caso de la variable Prácticas de Beneficio, que depende de la información suministrada por cada productor, puede presentarse un sesgo de la información, ya que muchos de los productores conocen cómo desarrollar las actividades de beneficio pero por cuestiones de tiempo, dinero, disponibilidad de mano de obra o herramienta, las ejecutan de una manera distinta al deber ser, por lo tanto, se sugiere que a futuro se pudiera hacer un seguimiento en cada finca para confirmar efectivamente como se llevan a cabo dichas labores.

El uso de FIS con variables categóricas puede dificultar que se obtengan resultados numéricamente diferentes para todas las fincas, y puede ocurrir que fincas con diferencias tengan resultados similares, como sucede, por ejemplo, con los resultados de Prácticas de Beneficio en O4 y O5, lo que difícilmente sucedería con variables continuas, esto se explica porque categorizar implica que la finca pertenece estrictamente a una alternativa y no a un término difuso entre una u otra, pues incluso los términos intermedios terminan siendo concebidos como categorías en sí mismas.

Conclusiones del Capítulo

A partir de los resultados promedio para cada zona (Ver Tabla 79) se concluye:

- En el caso del subsistema Suelo-Cultivo la mayor limitante de Chaparral y Ortega se refiere al nivel tecnológico de los sistemas de producción, que se explica principalmente porque la mayoría de las fincas carecen de un plan de fertilización acorde a los requerimientos específicos del suelo y del cultivo.
- En el caso de Mariquita la mayor limitante obedece a la Física del suelo, tanto en la Textura como en las propiedades Analíticas y Electrotérmicas, si bien en el caso de Chaparral y Ortega el indicador de Textura es apenas ligeramente mayor que los de Mariquita, la diferencia radica principalmente en los valores de las variables Analíticas y Electrotérmicas que resultaron ser muy superiores.

- En Mariquita y Ortega el Cd aparentemente es un problema específico para algunas fincas, sin embargo en Chaparral resultó ser una problemática más generalizada. En cuanto al Balance Nutricional el mayor desequilibrio lo presenta Ortega, explicado principalmente por suelos carentes del contenido de Materia Orgánica suficiente para el desarrollo del cultivo de Cacao.
- En el subsistema Socioeconómico la mayor limitante para Chaparral y Ortega se refiere a la Gestión Ambiental, mientras que en Mariquita se refiere a las condiciones de empleabilidad. En el caso de Chaparral también se destacan negativamente las condiciones de comercialización y financieras en torno al sistema de producción de cacao, así como los precarios servicios básicos de los que disponen los productores, esta última también resultó ser una característica a destacar en Ortega.
- Finalmente en el subsistema de Calidad de Cacao la principal falencia en las tres zonas se refiere a las condiciones físicas del grano, que fueron evaluadas a partir de los criterios definidos para la prueba de corte. Posiblemente eso explica la pobre formación de Aromas Específicos para dar notas distintivas al cacao producido en las tres zonas a pesar de que el control para la aparición de Defectos parece estarse aplicando satisfactoriamente. Con relación al Beneficio la mayor falla se presenta en las prácticas de cosecha en todas las zonas.
- Aunque el subsistema más limitante de la complejidad en las fincas de Mariquita sea la Calidad de Cacao, se resalta que sus valores estuvieron muy próximos de los obtenidos por Chaparral y Ortega, incluso en ese componente las tres zonas tuvieron un desempeño similar, lo que puede ser el resultado de la capitalización de conocimientos adquiridos a través de la experiencia y la estandarización de protocolos de manejo que pueden ser aplicados y replicados por las distintas entidades encargadas de la transferencia de resultados de investigación.

Tabla 79 Resultados promedio de las variables calculadas con GeoFIS

Variable	Chaparral	Mariquita	Ortega
SUELO	0,533	0,463	0,448
Química	0,547	0,523	0,410
Balance Nutricional	0,573	0,455	0,295
Cd	0,486	0,673	0,680
Física	0,514	0,376	0,503
Textura	0,388	0,322	0,347
Analítica	0,755	0,349	0,853
Electrotérmica	0,706	0,328	0,462
CULTIVO	0,456	0,596	0,555
Árbol	0,489	0,627	0,577
Productividad	0,502	0,808	0,631
Nutricional	0,515	0,627	0,629
Fitosanitario	0,476	0,384	0,455
Sistema	0,377	0,539	0,514
Nivel Tecnológico	0,207	0,459	0,259
Sombrío	0,627	0,381	0,725
Podas	0,366	0,752	0,793
SOCIAL	0,552*	0,618**	0,463
Servicios Básicos	0,383*	0,486**	0,335
Salud	0,663*	0,622**	0,551
Escolaridad	0,607*	0,747**	0,5
ECONÓMICO	0,408*	0,447**	0,473
Financiero	0,343*	0,540**	0,459
Empleo	0,504*	0,323**	0,493
Comercialización	0,380*	0,476**	0,468
GESTIÓN Y ADMÓN	0,442*	0,585**	0,501

Perfil del Responsable	0,625*	0,542**	0,666
Gestión Ambiental	0,269*	0,660**	0,313
Relacionamiento Institucional	0,424*	0,554**	0,52
CALIDAD SENSORIAL	0,558	0,557	0,559
Aromas	0,358	0,303	0,356
Sabores Básicos	0,577	0,564	0,531
Defectos	0,742	0,756	0,755
CALIDAD FISICOQUIMICA	0,338	0,352	0,273
Química	0,646	0,537	0,354
Física	0,176	0,234	0,206
BENEFICIO	0,485	0,462	0,516
Cosecha	0,244	0,256	0,385
Poscosecha	0,533	0,499	0,504

CAPÍTULO 5. DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN PARA DINAMIZAR LOS FACTORES LIMITANTES DE LA COMPLEJIDAD DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CACAO EN TRES ZONAS DEL TOLIMA

Una vez desarrollado el modelo empírico propuesto para calcular matemáticamente el indicador de complejidad de los sistemas de producción de cacao usando lógica difusa, y soportado en sus resultados, se empleó la técnica de Modelación Basada en Agentes (MBA) con el objetivo de proponer estrategias de adaptación de los sistemas de producción a nivel de finca, estrategias enfocadas en dinamizar las interacciones que favorecen la complejidad de los sistemas, esto sobre la base de que a mayor complejidad mayor tendencia a que los sistemas se adapten para subsistir en el tiempo y el espacio.

A continuación se presenta el protocolo ODD (Overview, Design concepts and Details), esto es, la concepción del modelo conceptual, la modelación en Netlogo, los resultados matemáticos de la simulación por finca y finalmente se muestran los resultados matemáticos del análisis de sensibilidad propuesto.

5.1. Protocolo ODD: Descripción General del Modelo

A partir de la modelación en GeoFis se obtuvo que en promedio la mayor limitante de las fincas de Chaparral y Ortega es el subsistema Socioeconómico, 0,468 y 0,479 respectivamente, y en segunda instancia el subsistema de Calidad de Cacao, este último fue el principal limitante en las fincas de Mariquita con un valor de 0,491.

Por lo anterior se procedió a implementar un MBA en Netlogo Versión 6.1.1 que además incorporó el SIG de cada finca para analizar el indicador Socioeconómico como propiedad emergente.

Propósito

El modelo busca calcular la relación entre las variables que integran el indicador Socioeconómico y mostrar como cambios en los indicadores del entorno Económico y Gestión y Administración pueden alterar el resultado del índice Socioeconómico con el fin que estos resultados sirvan de sustento para tomar decisiones que contribuyan a aumentar la complejidad de los sistemas de producción de cacao.

Entidades, Variables de Estado y Escalas

Conforme (Aguilera Ontiveros & Posada Calvo, 2018) las entidades pueden ser: agentes/individuos, unidades espaciales, ambiente y colectivo.

Se entiende por Agentes a los diversos, autónomos e interdependientes componentes de un sistema complejo adaptativo (Lara-Rosano et al., 2017). En este caso los Agentes corresponden a: Social, Económico y Gestión y Administración para cada finca. Las variables correspondientes a cada Agente obedecen a las mismas que se tuvieron en cuenta usando GeoFis, gráficamente dicha estructura puede visualizarse en la Figura 27.

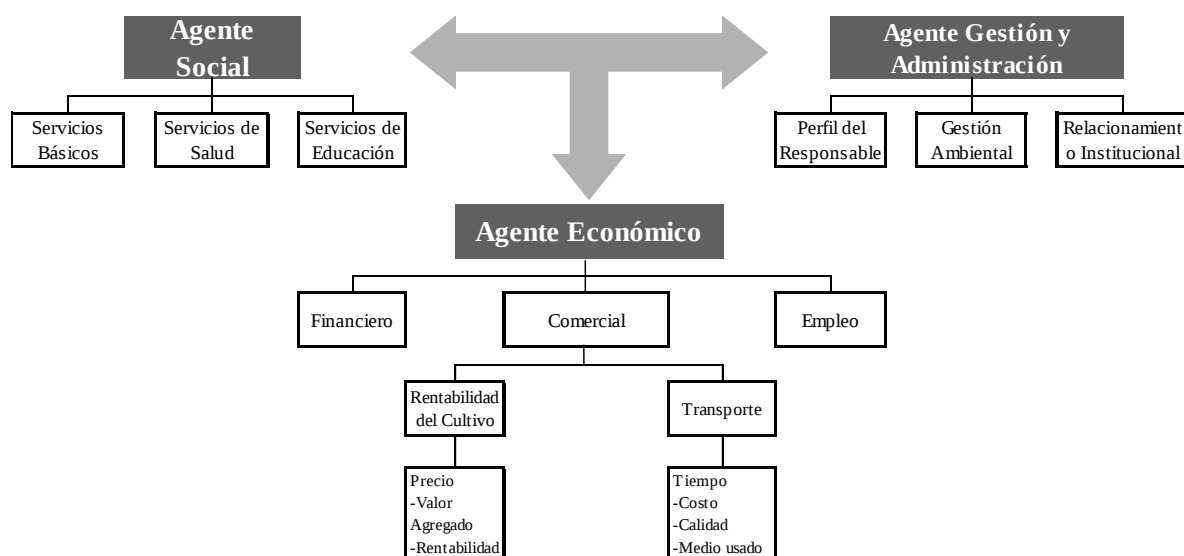


Figura 27 Marco conceptual del MBA para calcular Índice Socioeconómico

Las variables de estado para el Agente Social corresponden a las variables Servicios Básicos, de Salud y de Educación. En el caso del Agente de Gestión y Administración son el Perfil del Responsable de la UP, la Gestión Ambiental y el Relacionamiento institucional. En el Agente Económico son los elementos: Financiero y Empleo medidas en los valores (adimensionales en una escala de 0 a 1) obtenidos por los procedimientos de agregación en GeoFis y que fueron explicados en el Capítulo 3 para calcular cada variable. Adicionalmente en el Agente Económico se incluyen las variables de estado Precio

(Valor>0), Valor Agregado (%), Rentabilidad (%), Condiciones de transporte: Tiempo (horas), Costo (COP \$), Calidad de la vía y Medio empleado, estas dos últimas corresponden a una escala categórica entre 1 y 3.

Descripción General de los Procesos y Programación

El mapa del lote de cacao (Shape) y los datos de cada una de las variables de estado se actualizaron con la información real correspondiente para el sistema de producción a nivel de finca.

5.2. Protocolo ODD: Conceptos de Diseño

A continuación se explican cada uno de los elementos tenidos en cuenta para garantizar que las decisiones importantes del diseño se hicieron de manera consciente, conforme lo sugiere (Aguilera Ontiveros & Posada Calvo, 2018) y tomando como referencia las aplicaciones presentada en (Lara-Rosano et al., 2017).

Principios Básicos

El modelo estuvo basado en el modelo empírico propuesto para calcular el índice de complejidad de los sistemas de producción de cacao. Se hizo énfasis en el subsistema Socioeconómico porque se halló evidencia que este es el principal limitante en la mayoría de las fincas.

Emergencia

El indicador Socioeconómico como propiedad emergente de la interacción entre las condiciones Sociales, Económicas y de Gestión y Administración de los sistemas de producción de cacao.

Adaptación

En el caso de la variable “Rentabilidad de cacao” se integraron 3 variables (Precio, Valor Agregado y Percepción rentabilidad), la base de reglas para dicha variable se definió teniendo en cuenta una granularidad de tres niveles (Bajo: $> 0,1$ AND $\leq 0,39$; Medio: $> 0,39$ AND $\leq 0,6$; Alto: $> 0,6$ AND ≤ 1), se fijó 0,1 como umbral mínimo para activar las reglas de las variables Valor Agregado y Rentabilidad, que están medidas en términos porcentuales, para Precio el umbral mínimo establecido fue 0,39 (recordar que es una proporción entre el precio de venta y el de equilibrio, entonces 1 significa que no tienen pérdidas ni ganancias, cualquier valor inferior a 1 son pérdidas y por encima de 1 son ganancias). De esta manera se obtuvo un total de 28 reglas, incluyendo una regla igual a cero cuando las tres variables de entrada son menor o igual que el umbral mínimo descrito anteriormente.

Para el cálculo de la variable Transporte se distinguió cuando el Tiempo ≤ 45 min y cuando es > 45 min, cuando el Costo es $\leq \$4.500$ o mayor que ese monto, y cuando las variables categóricas Calidad de la Vía y Medio de Transporte toman algún valor de los definidos previamente, las cuales son: para la primera variable 1 si la vía incluye Travesía + Trocha+ Pavimento, 2 para Trocha + Pavimento y 3 cuando toda la vía es pavimentada; en el caso del Medio usado son: 1 si usa Tracción animal + Auto alquilado, 2 para Automotor Alquilado y 3 Automotor propio.

En el cálculo de Comercial se agregaron Rentabilidad Cacao y Transporte, considerando 37 reglas de decisión, una cuando ambas variables son $\leq 0,1$ y otra cuando ambas son igual a 1, las demás reglas corresponde a la combinación de las variables cuando toman una granularidad de cinco niveles (Bajo: $> 0,1$ AND $\leq 0,2$; Medio Bajo: $> 0,2$ AND $\leq 0,4$; Medio: $> 0,4$ AND $\leq 0,6$; Medio Alto: $> 0,6$ AND $\leq 0,8$; Alto: $> 0,8$ AND < 1).

Para el cálculo de los Factores (Social, Económico, de Gestión y Administración) así como del indicador Socioeconómico, se calculó un promedio ponderado asignando el mismo (0,33) a las variables que lo componen.

Objetivos

Entre más cercano a uno sea el resultado de cada variable calculada mayor complejidad del subsistema socioeconómico y por tanto del sistema de producción, a mayor nivel de complejidad mayor posibilidades de que el sistema de producción se adapte para subsistir en el tiempo y en el espacio.

Interacción

Los Agentes Social, Económico y de Gestión y Administración interactúan a través de las reglas de decisión que dan lugar al indicador Socioeconómico. Para cada uno se consideró la misma ponderación.

Aleatoriedad

Los valores de todas las variables de estado estuvieron basados en datos reales, algunos de los datos usados resultaron del procesamiento en GeoFis y otros corresponden a la información tomada directamente en campo.

Colectivos

El modelo representa como colectivo, esto es, como entidad independiente, con sus propias variables de estado y rasgos a la variable Comercial, que emerge de la interacción entre la Rentabilidad del cultivo de cacao y las condiciones de Transporte.

Observación

Los resultados del modelo necesarios para observar la dinámica interna y el comportamiento a nivel de sistema son los de los Factores Social, Económico, de Gestión y Administración, el cálculo de la Rentabilidad del cultivo de cacao, del Transporte y de la variable Comercial. Para calibrar el modelo se emplearon los datos de las fincas de Chaparral y para validarlo se usaron los de las fincas de Ortega y Mariquita.

5.3. Protocolo ODD: Detalles

A continuación se presentan los elementos de inicialización, datos de entrada y submodelos.

Inicialización

El modelo de simulación inicia con tres Agentes, siempre con todos sus contadores igual a cero. El plano de la finca vacío, las variables de estado igual a cero y las variables calculadas igual a cero.

Datos de Entrada

Las entradas del modelo están basadas en datos reales tomados en campo y otros generados a partir de procesamiento de los datos iniciales en GeoFis, los datos fueron recolectados desde Dic/2018 hasta Dic/2019, y procesados desde Jul/2019 hasta Dic/2021.

Los datos fueron cargados en la plataforma NetLogo a través de un archivo cvs y un Shape correspondiente a la georreferenciación de los lotes del cultivo de cacao que fueron tomadas en cada finca y posteriormente proyectados en ArcGis con coordenadas WGS 84.

Submodelos

Los submodelos que representan los procesos de la visión general y la programación de procesos fueron la creación de los Agentes: Social, Económico y de Gestión y Administración (Ver Figura 27). En el caso de los Agentes Social y de Gestión y Administración los valores de las variables estado corresponden a los cálculos resultantes del modelo empírico propuesto para calcular el índice de complejidad de los sistemas de producción de cacao usando sistemas de inferencia difusa sobre la base de conocimiento experto.

En el caso del Agente Económico se tuvieron en cuenta las bases de reglas de la Tabla 80 para calcular la variable Rentabilidad del cultivo, de la Tabla 81 para la variable Transporte y la Tabla 82 para la variable Comercial.

Dado que la variable Precio corresponde al Precio de venta como proporción del Precio de Equilibrio esta puede tomar valores de cero hasta más de 1, sin embargo un resultado inferior a 0,5 implica una amplia brecha entre ambos precios que haría económicamente inviable la comercialización del grano, por tal razón se asumieron valores superiores a 0,39 para efectos de definir la base de reglas.

Tabla 80 Base de reglas para calcular la variable Rentabilidad del cultivo

Precio	Valor Agregado	Percepción Rentabilidad	Conclusión
$\leq 0,39$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	0
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	0,15
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$\leq 0,1$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	0,19
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$\leq 0,1$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	0,23
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$\leq 0,1$	$> 0,6$ AND ≤ 1	0,25
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$\leq 0,1$	0,19
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	0,24
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	0,28
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$> 0,6$ AND ≤ 1	0,32
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$\leq 0,1$	0,23
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	0,28
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	0,32
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,6$ AND ≤ 1	0,38
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,6$ AND ≤ 1	$\leq 0,1$	0,25
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	0,32
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	0,38
$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,6$ AND ≤ 1	0,43
$> 0,6$ AND ≤ 1	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	0,32
$> 0,6$ AND ≤ 1	$\leq 0,1$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	0,41
$> 0,6$ AND ≤ 1	$\leq 0,1$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	0,47
$> 0,6$ AND ≤ 1	$\leq 0,1$	$> 0,6$ AND ≤ 1	0,51
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$\leq 0,1$	0,41
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	0,55
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	0,61
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$> 0,6$ AND ≤ 1	0,65
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$\leq 0,1$	0,47
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	0,61
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	0,67
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	$> 0,6$ AND ≤ 1	0,7
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,6$ AND ≤ 1	$\leq 0,1$	0,51
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	0,65
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	0,7
$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,6$ AND ≤ 1	$> 0,6$ AND ≤ 1	0,73
> 1	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	0,67
> 1	$\leq 0,1$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	0,7
> 1	$\leq 0,1$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	0,73
> 1	$\leq 0,1$	$> 0,6$ AND ≤ 1	0,76
> 1	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$\leq 0,1$	0,7
> 1	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	0,76
> 1	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$> 0,39$ AND $\leq 0,6$	0,79
> 1	$> 0,1$ AND $\leq 0,39$	$> 0,6$ AND ≤ 1	0,82

> 1	>0,39 AND <=0,6	<=0,1	0,73
> 1	>0,39 AND <=0,6	>0,1 AND <=0,39	0,79
> 1	>0,39 AND <=0,6	>0,39 AND <=0,6	0,85
> 1	>0,39 AND <=0,6	>0,6 AND <=1	0,87
> 1	>0,6 AND <=1	<=0,1	0,76
> 1	>0,6 AND <=1	>0,1 AND <=0,39	0,82
> 1	>0,6 AND <=1	>0,39 AND <=0,6	0,87
> 1	>0,6 AND <=0,8	>0,6 AND <=0,8	0,9
> 1	>0,8 AND <=1	>0,8 AND <=1	1

Tabla 81 Base de reglas para calcular la variable Transporte

Tiempo	Costo	Calidad_Vía	Medio	Transporte
<=45	<= 4500	< =2	<=1	0
<=45	<= 4500	< =2	>1 AND <=3	0,1
<=45	<= 4500	>2 AND <=3	<=1	0,5
<=45	<= 4500	>2 AND <=3	>1 AND <=3	0,6
<=45	> 4500	< =2	<=1	0,25
<=45	> 4500	< =2	>1 AND <=3	0,35
<=45	> 4500	>2 AND <=3	<=1	0,8
<=45	> 4500	>2 AND <=3	>1 AND <=3	0,85
>46	<= 4500	< =2	<=1	0,15
>46	<= 4500	< =2	>1 AND <=3	0,2
>46	<= 4500	>2 AND <=3	<=1	0,65
>46	<= 4500	>2 AND <=3	>1 AND <=3	0,75
>46	> 4500	< =2	<=1	0,4
>46	> 4500	< =2	>1 AND <=3	0,45
>46	> 4500	>2 AND <=3	<=1	0,9
>46	> 4500	>2 AND <=3	>1 AND <=3	0,1

Tabla 82 Base de reglas para calcular la variable Comercial

Rentabilidad Cacao	Transporte	Comercial
<=0,1	<=0,1	0
<=0,1	>0,1 AND <=0,2	0,03
<=0,1	>0,2 AND <=0,4	0,06
<=0,1	>0,4 AND <=0,6	0,08
<=0,1	>0,6 AND <=0,8	0,11
<=0,1	>0,8 AND <=1	0,14
>0,1 AND <=0,2	<=0,1	0,17
>0,1 AND <=0,2	>0,1 AND <=0,2	0,19
>0,1 AND <=0,2	>0,2 AND <=0,4	0,22
>0,1 AND <=0,2	>0,4 AND <=0,6	0,25
>0,1 AND <=0,2	>0,6 AND <=0,8	0,28
>0,1 AND <=0,2	>0,8 AND <=1	0,31
>0,2 AND <=0,4	<=0,1	0,33
>0,2 AND <=0,4	>0,1 AND <=0,2	0,36
>0,2 AND <=0,4	>0,2 AND <=0,4	0,39
>0,2 AND <=0,4	>0,4 AND <=0,6	0,42
>0,2 AND <=0,4	>0,6 AND <=0,8	0,44
>0,2 AND <=0,4	>0,8 AND <=1	0,47
>0,4 AND <=0,6	<=0,1	0,50
>0,4 AND <=0,6	>0,1 AND <=0,2	0,53
>0,4 AND <=0,6	>0,2 AND <=0,4	0,56
>0,4 AND <=0,6	>0,4 AND <=0,6	0,58

>0,4 AND <=0,6	>0,6 AND <=0,8	0,61
>0,4 AND <=0,6	>0,8 AND <=1	0,64
>0,6 AND <=0,8	<=0,1	0,67
>0,6 AND <=0,8	>0,1 AND <=0,2	0,69
>0,6 AND <=0,8	>0,2 AND <=0,4	0,72
>0,6 AND <=0,8	>0,4 AND <=0,6	0,75
>0,6 AND <=0,8	>0,6 AND <=0,8	0,78
>0,6 AND <=0,8	>0,8 AND <=1	0,81
>0,8 AND <=1	<=0,1	0,83
>0,8 AND <=1	>0,1 AND <=0,2	0,86
>0,8 AND <=1	>0,2 AND <=0,4	0,89
>0,8 AND <=1	>0,4 AND <=0,6	0,92
>0,8 AND <=1	>0,6 AND <=0,8	0,94
>0,8 AND <1	>0,8 AND <11	0,97
1	1	1

Para calcular el valor emergente de la interacción entre las variables estado de cada Agente se consideró un promedio ponderado en el que cada variable estado tuvo el mismo peso, y un total de pesos igual a uno, Por ejemplo, el Factor del Agente Social = (Servicios Básicos*0,34 +Salud*0,33+Educación*0,33).

Similar procedimiento se llevó a cabo para calcular el indicador socioeconómico, como propiedad emergente de la interacción entre los tres Agentes, esto es: (Social * 0,33 + Económico * 0,34 + Gestión&Admon * 0,33).

Entre más próximo a uno esté el indicador socioeconómico mayor complejidad del sistema de producción y por tanto mayor probabilidad de adaptarse y subsistir en el tiempo y en el espacio.

Las estimaciones del modelo inicialmente se llevaron a cabo con los datos de las 9 fincas de Chaparral con información completa, Una vez los resultados fueron contrastados con la realidad y comparados con la tendencia de los resultados de GeoFis, se procedió a replicar el modelo para las fincas de Mariquita y Ortega.

Interfaz Gráfica

Tomando como ejemplo los datos de la finca C9, en la Figura 28 se presenta la interfaz gráfica del modelo una vez se carga el Shape de la finca (botón Setup), se leen los valores de base de datos del archivo .csv y posteriormente se ejecuta el código (botón go).

Para la finca C9 el cálculo Social fue de 0,428; del Económico fue 0,366 y del Gestión y Administración 0,298; para un resultado del indicador Socioeconómico de 0,364.

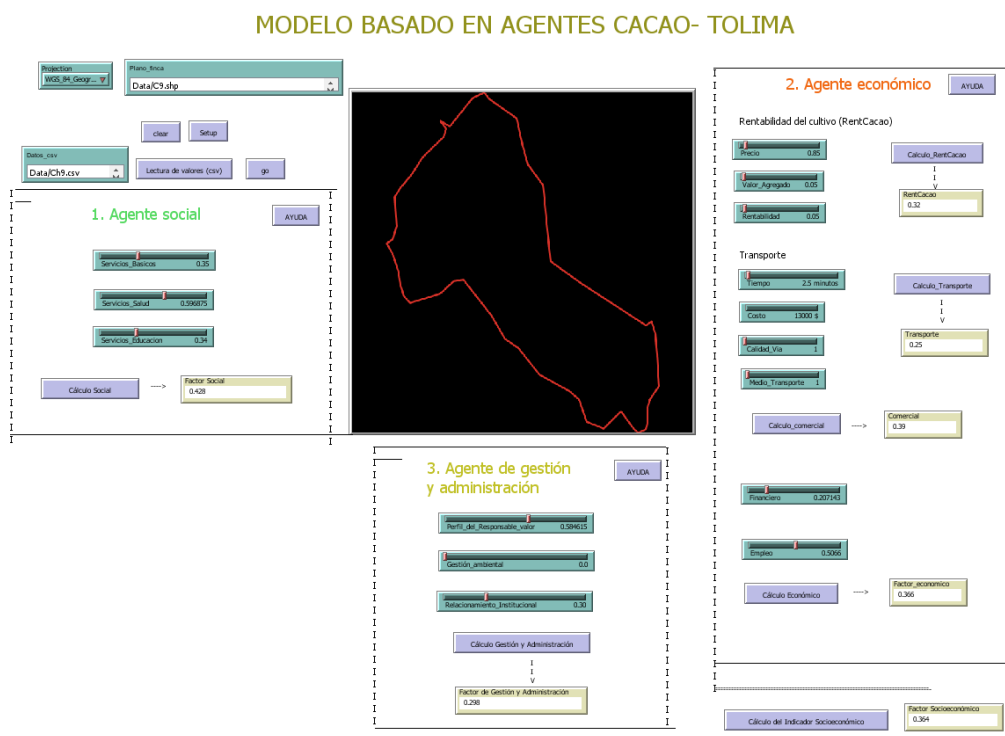


Figura 28 Interfaz gráfica del MBA Cacao- Tolima

Simulando un cambio en la variable Servicios Básicos (inicialmente 0,35) hasta alcanzar un valor de 0,8 se da clic en el botón Social para recalculer su valor y este asciende a 0,581, posteriormente se cliquea en el botón del indicador Socioeconómico para recalcularlo y resulta en 0,415 con el cambio supuesto (Ver Figura 29).

De manera que con esta plataforma es posible comprender y visualizar de manera fácil y rápida como un cambio en una o más variables de entrada se altera la variable de salida, entonces es posible crear escenarios sobre estados futuros del sistema y analizar los resultados potenciales. Por lo tanto, es una herramienta útil para respaldar el análisis riguroso de posibles efectos de alternativas de política o intervenciones de gestión sobre un sistema, en este caso el Socioeconómico.

MODELO BASADO EN AGENTES CACAO- TOLIMA

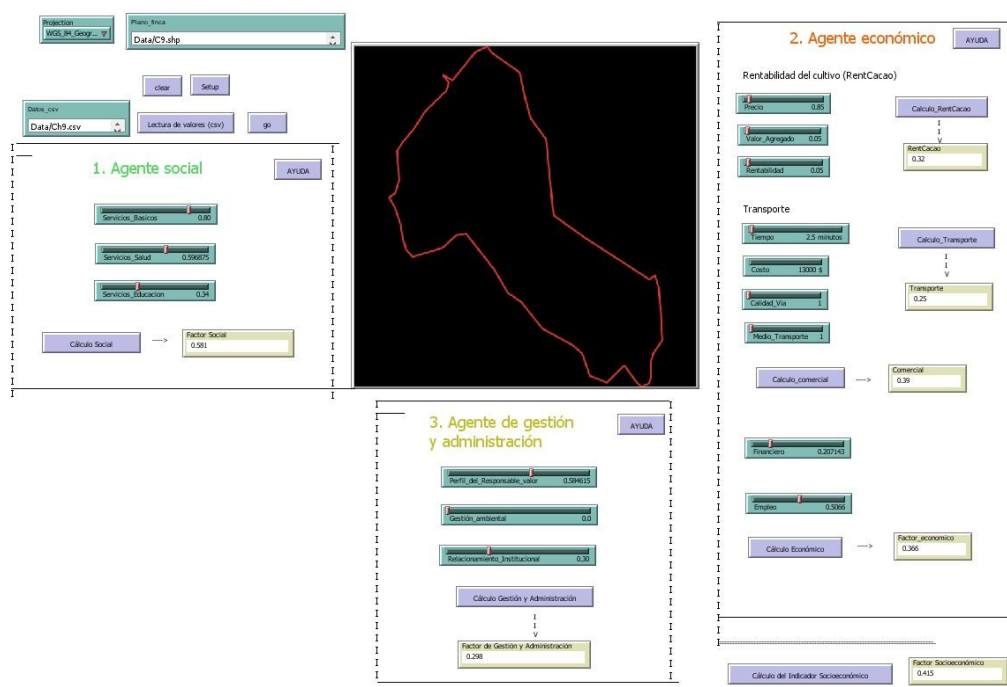


Figura 29 Resultados MBA Cacao para C9 suponiendo un aumento en Servicios Básicos

5.4. Resultados de la Simulación Usando el Modelo Basado en Agentes

Después de ejecutar el código en plataforma para cada una de las fincas se obtuvieron los resultados matemáticos que se muestran en la Tabla 83.

Los resultados obtenidos empleando MBA siguen la misma tendencia y son similares en valor a los arrojados por GeoFIS, la diferencia son centésimas e incluso en algunos casos (C3, M4, M6, O6, O7, O8,) el valor entregado por ambas técnicas es el mismo. La ventaja de MBA radica en la posibilidad de usar el botón deslizador que representa cada variable de estado para ver como cambios en alguna de las variables inciden en el resultado del indicador Socioeconómico final.

Teniendo en cuenta que de los Agentes que componen el indicador Socioeconómico sólo en el Económico (específicamente en Valor Agregado) y en el de Gestión y Administración el productor tiene alguna injerencia en el corto plazo sin requerir una inversión monetaria directa, se simulaban cambios positivos en ambos Agentes, de manera independiente, con el fin de evaluarlas como estrategias de adaptación de los sistemas de producción analizados.

Tabla 83 Valor del indicador socioeconómico usando MBA

Finca	Indicador Socioeconómico MBA	Finca	Indicador Socioeconómico MBA	Finca	Indicador Socioeconómico MBA
C1	-	M1	0,670	O1	0,507
C2	0,423	M2	0,528	O2	0,493
C3	0,571	M3	-	O3	0,531
C4	0,449	M4	0,457	O4	0,576
C5	0,506	M5	-	O5	0,550
C6	0,486	M6	0,518	O6	0,427
C7	0,530	M7	0,732	O7	0,369
C8	0,533	M8	0,455	O8	0,375
C9	0,364	M9	0,641	O9	0,663
C10	0,542	M10	-	O10	0,499

Para efectuar el cambio en las variables Valor Agregado y Relacionamiento Institucional se supuso que los cambios ocurrían de la siguiente manera:

Si el valor inicial $\leq 0,1$ Entonces incrementa hasta alcanzar el valor de 0,39

Si el valor inicial $> 0,1$ y $\leq 0,39$ Entonces incrementa hasta alcanzar el valor de 0,6

Si el valor inicial $> 0,39$ y $< 0,6$ Entonces incrementa hasta alcanzar el valor de 0,8

Si el valor inicial $\geq 0,6$ y ≤ 1 Entonces incrementa hasta alcanzar el valor de 1

Escenario A: Cambio en el Agente Económico (Crear o agregar valor al producto)

Agregar valor a un producto agrícola implica incorporar recursos y esfuerzos adicionales al bien primario, esto puede lograrse a través de tareas sencillas de diferenciación como la clasificación por calidad o por vínculos con el territorio de origen, o por actividades que implican un mayor grado de especialización como la transformación o la conservación, o por la apropiación de externalidades que genera el proceso productivo primario, como es el aprovechamiento de subproductos o la compensación de servicios ambientales (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2014).

Por ser una *commodity* la apropiación del valor agregado en el mercado de cacao generalmente implica mayor procesamiento, y por lo tanto, deberá traducirse en mayores ingresos que los obtenidos por la venta del bien primario, de forma que este debe ser un aspecto estratégico a fortalecer en todos los eslabones de la cadena productiva.

Como propuestas para fomentar la agregación de valor en los sistemas productivos de cacao analizados están:

A nivel individual

- Corregir falencias en la fermentación, secado y almacenamiento para mejorar los atributos de calidad del grano
- Ajustar clasificación y empaque del bien primario
- Implementar tecnologías alternativas para producir chocolate a escala artesanal especialmente en las fincas con infraestructura vial que dificulta la comercialización en grandes volúmenes
- Trabajar en la formulación para producir alimentos tradicionales y poco intensivos en el uso de tecnología como la chula (mezcla de cacao, panela y maíz)

A nivel de Asociación

- Identificar segmentos del mercado con demandas específicas, caracterizar y organizar consumidores potenciales
- Trabajar en la construcción de una identidad colectiva basada en la diferenciación por atributos relacionados con la protección del medioambiente y los derechos laborales
- Promocionar el agroturismo en fincas cacaoteras del Tolima

Es importante resaltar que parte del éxito de estas propuestas depende de que el mercado reconozca en términos monetarios las inversiones y los esfuerzos adicionales que realizan los productores. Así lo evidencian las respuestas en la entrevista socioeconómica en lo referente a la influencia que tiene el precio pagado al productor sobre la cantidad de tiempo y de dinero que le invierte al cultivo y si el mercado reconoce el esfuerzo que implica vender un producto de mejor calidad, ante lo que los productores manifestaron:

Productor M1: Que le pagaran mejor uno le podría dedicar más obreros/más claro porque yo he trabajado para dedicarle más tiempo. [...] uno le hace un buen beneficio/una buena fermentación y un buen secado y me lo pagan al mismo precio que otro que no le hace absolutamente nada.

Productor M2: Porque pues donde el precio fuera mayor pudiera uno hacer muchas otras cosas/ muchas veces el precio lo detiene a uno de tener los cultivos mejores.

Productor M4: Pues ellos le dicen a uno aceptable/ está muy bueno su producto y medio lo miran y dicen aaah no está bien/ eso no hay que cuestionarlo/ Pero que haya un estímulo por calidad/ no/ en absoluto.

Productor M8: Pues ahora no lo reconoce [...] a veces yo veo gente que lleva chocolate feo a vender y uno lleva un chocolate bonito/bueno/ y le aumenta por ahí \$100-\$200 en kilo.

Productor M9: [...] o sea si el precio es alto pues uno le invierte más/ pero si está bajo entonces eso mismo [...] aquí si uno lleva un buen producto lo pagan al mismo precio que lo lleve alguien que no lo haga.

Productor C2: [...] si fuera más remunerado pues más podría hacer las cosas uno mejor [...] principiando que uno lleva cacao y la cooperativa paga menos que el que está comprando por allá afuera/entonces no pagan legalmente bien.

Productor C8: [...] si lo lleva allí al mercado con todo y basura se lo pagan al mismo precio que si usted lo escoge y lo lleva con buena calidad/porque yo por lo menos que soy uno que como le digo/estoy desde que lo estoy recolectando estoy sacando/lo estoy separando a los otros que no hacen sino secarlo de cualquier manera y recolectarlo de cualquier manera y se lo van a pagar por el mismo precio/entonces no justifica.

Productor C10: [...] el intermediario cuando le reconoce a uno la calidad/compran un cacao bueno y compran una pasilla y al rato lo están revolviendo/entonces ellos le dañan tanto lo que compran como lo que venden de buena calidad/dañan eso.

Productor O3: A mí me ha pasado y tuve que vender y yo inclusive le dije al señor que lo compro hay y cómo lo va a revolver un cacao que estaba allá muy feito y el que yo llevaba súper/ lo revolvieron allá y lo pagan igual/entonces eso si lo desmotiva a uno [...]

Productor O7: [...] si uno lo va a vender allí en el pueblo/ vaya como vaya se lo van a pagar a lo mismo.

Con la implementación de algunas de las actividades señaladas para agregar valor al cacao se espera un incremento del indicador socioeconómico de las fincas y por tanto del índice de complejidad de sus sistemas de producción. Los resultados suponiendo un aumento en la variable Valor Agregado (perteneciente al Agente Económico), manteniendo

todo lo demás constante, se presentan en la columna titulada Escenario A de la Tabla 84 para cada una de las fincas en las tres zonas analizadas.

En las fincas C2, C5, C6, M4, M6, M7, M8, M9, O1, O2, O5, O8 y O9 el cambio en Valor Agregado, conforme los criterios establecidos antes, consiguió afectar la variable Comercial, el factor Económico y por tanto el indicador final Socioeconómico de manera ascendente.

Por otro lado, en las fincas C3, C4, C8, C9, C10, M1, M2, O3, O4, O6, O7 y O10 aunque el cambio positivo en el Valor Agregado aumentó la variable Rentabilidad del cultivo de Cacao, con las reglas propuesta las variables Precio y Percepción de rentabilidad restringieron dicho aumento, impidiendo que se alteren la variable Comercial y el Factor Económico asimismo como el resultado del indicador Socioeconómico, de manera que para lograr modificarlos positivamente tendría que aumentar el Valor Agregado en magnitud mayor a la propuesta, y/o el cambio propuesto debe ir acompañado de una mejora en la relación entre el precio de venta y el precio de equilibrio (variable Precio) o en la rentabilidad del cultivo percibida (variable Rentabilidad) o ambas.

Con las reglas propuestas las fincas con Valor Agregado inferior 0,6 tienen mayor oportunidad de aumentar la magnitud de dicha variable en comparación con sus equivalentes con valores iniciales superiores a 0,6, eso explica porque, por ejemplo, C3 y C4 (con valor inicial inferior a 0,1) tuvieron un cambio potencialmente mayor que C8 (valor inicial próximo de 0,5) y porque O3 y O4 con Valor Agregado inicial de 0,65 cada una, no presentaron aumento.

Escenario B: Cambio en el Agente Gestión y Administración (Fortalecer el asociativismo)

Asociarse le da a los productores la posibilidad de comprar insumos o herramientas que de manera individual sería difícil o poco rentable adquirir, acceder a recursos de programas estatales, controlar la red de distribución o agregarle valor al producto, generar volumen para negociar mejor con proveedores y clientes, y en ese sentido generar economías de escala, haciendo que compitan más eficientemente y mejoren su posición en la cadena productiva y en el mercado (Amézaga et al., 2013; Burin, 2017).

La asociación debe basarse en vínculos sociales, comerciales, de confianza, comunicación, participación y compromiso. Sin embargo, cuando se les indagó a los treinta productores por la percepción frente al trabajo de la asociación y como ésta ha contribuido para participar en programas de fomento, apoyar la comercialización, acceder a crédito, recibir asistencia técnica, capacitación y representar sus intereses, se hallaron las siguientes expresiones:

Productor M3: Me pagan COP \$400 más fuera de la cooperativa entonces yo tengo que buscar donde me beneficie/ pues allí estoy por medio de unos proyectos /que de pronto van a salir unos proyectos para sembrar más/y de pronto para hacer el secado/pero de todas maneras yo no puedo perder COP \$400 / porque es que ni el mismo Presidente de la asociación, él le vende a otra entidad/ porque venga le digo a él le pagan como casi COP \$1.000 pesos más/en kilo.

Productor M5: [...] No se ha visto nada/entonces como haría yo para darle respuesta a algo invisibles/porque es que no se ha visto ejercer absolutamente nada/ si uno dijera hombre ya se ha buscado aquí/hemos cateado con esto y esto listo/pero no hemos visto/llevamos dos años y no hemos visto ninguna gestión productiva.

Productor M7: [...] los socios quiere que uno responda por todo pero ellos no colaboran absolutamente con nada/ hay veces yo le digo a unos yo no puedo ir a tal/hay yo tampoco/dígale a fulano y yo no [...]

Productor M10: [...] En la Cooperativa es más por apoyarlos a ellos que no porque me apoyen a mí.

Productor C5: Pues digamos que siempre se ha gestionado/ se ha hecho algo pues igual también le falta mucho.

Productor C6: nos van a dar eso/ pero el cuento es que nos van a dar/ pero no han dado nada todavía.

Productora O1: Estamos que el presidente que tenemos no nos sirve/sí se han hecho buenas gestiones si no que las cosas que han dado se las han repartido entre ellos/igual nos dimos cuenta.

Productor O9: Hasta el momento aquí no han contribuido con nada [...] no lo he tomado/pero si nos han asesorado sobre crédito [...] Han venido muchas personas a

hacer asistencia técnica [...] Han capacitado en temas sobre el medio ambiente/podas/plagas/injertación.

Vale la pena aclarar que máximo tres productores en cada municipio pertenecen a una misma asociación, pese a ello en las tres zonas se encontraron opiniones que reflejan la necesidad de fortalecer las asociaciones, toda vez que el trabajo conjunto puede ser un mecanismo para consolidar las capacidades productivas y comerciales de los productores.

En el caso de Mariquita se destaca la necesidad de que los productores se reorganicen con pares que tengan realidades y capacidades económicas homogéneas, esto se debe a las relaciones de poder internas jerárquicas que tienden a surgir. Los productores más grandes tienen intereses y aversión a riesgos económicos y comerciales diferentes porque su condición se los permite, y por lo tanto intentarán imponer su voluntad (Burin, 2017).

Dentro de las propuestas que podrían contribuir a que se haga realidad el incremento en la variable Asociativismo, y consecuentemente el Relacionamento institucional, están:

1. Realizar un diagnóstico interno de la organización desde su origen.
2. Diseñar o rediseñar y trabajar colectivamente en función de un plan estratégico, un plan de agronegocios y un plan operativo, cada uno de los cuales puede contener los elementos relacionados en la Figura 30.
3. Diseñar un sistema de indicadores de mediano y largo plazo para medir sus resultados y desempeño.
4. Delegar responsabilidades entre los miembros de la asociación con el fin de descentralizar la toma de decisiones y evitar la sobrecarga de tareas en pocas personas, favoreciendo la participación de todos los asociados.
5. Realizar actividades sociales para mejorar la relación entre los asociados así como talleres para concienciarlos de los beneficios de colaborar y cooperar.
6. Promover estrategias comunicativas y de acción como rendición de cuentas anuales y participación en eventos de la comunidad.

Plan Estratégico: - Análisis FODA (fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas) de la organización - Misión y visión de la organización definidas colectivamente - Objetivos estratégicos - Líneas de acción prioritarias y asignación de recursos - Indicadores y metas a mediano y largo plazo - Un sistema de medición de resultados y de desempeño	Plan de Agronegocios: - Idea del agronegocio - Metas y objetivos / definición del mercado objetivo - Plan de mercadeo / estrategia de comercialización - Plan de producción o estudio técnico - Estudio financiero - Plan de gestión del riesgo agroempresarial e impacto ambiental	Plan Operativo: -Cronograma de actividades (Tarea, fechas, responsables e indicadores) -Presupuesto para realizar tareas (Unidad, cantidad, costos) -Seguimiento mensual (producto esperado, % ejecutado, observaciones y medidas correctivas)
--	---	---

Figura 30 Estructura de Plan Estratégico, de Agronegocio y Operativo para el fortalecimiento organizacional (Amézaga et al., 2013)

Realizando esas actividades se espera la consolidación del tejido asociativo en los tres municipios, de manera que se generen sinergias que potencien la complejidad de los sistemas productivos a través del desarrollo de proyectos conjuntos e iniciativas innovadoras, y así se fortalezca el Relacionamento Institucional para todas las fincas.

Los resultados cuando se supuso un incremento en la variable Relacionamento Institucional, manteniendo todo lo demás constante, se presentan en la columna titulada Escenario B en la Tabla 84.

Tabla 84 Resultados del Indicador Socioeconómico suponiendo cambios en las Variables Valor Agregado (Escenario A) o Relacionamento Institucional (Escenario B)

Finca	Escenario		Finca	Escenario		Finca	Escenario	
	A	B		A	B		A	B
C1	-	-	M1	0,670	0,681	O1	0,525	0,518
C2	0,441	0,466	M2	0,528	0,570	O2	0,511	0,537
C3	0,571	0,601	M3	-	-	O3	0,531	0,574
C4	0,449	0,491	M4	0,476	0,489	O4	0,576	0,576
C5	0,524	0,550	M5	-	-	O5	0,568	0,582
C6	0,504	0,529	M6	0,536	0,553	O6	0,427	0,460
C7	0,549	0,563	M7	0,750	0,743	O7	0,369	0,411
C8	0,533	0,544	M8	0,473	0,497	O8	0,394	0,418
C9	0,383	0,397	M9	0,659	0,652	O9	0,682	0,674
C10	0,542	0,575	M10	-	-	O10	0,499	0,541

La única finca que no presentó cambio alguno en el indicador Socioeconómico cuando incrementó la variable Relacionamento Institucional fue O4 debido a que tenía un valor inicial de 1,0 en dicha variable. Todas las demás fincas presentaron un incremento.

El aumento causado por un cambio en el Relacionamento Institucional es mayor que cuando solo aumenta el Valor Agregado debido a que en el primer caso se trata de una variable agregada, entonces tiene mayor peso e impacto sobre el indicador socioeconómico.

En el caso de las fincas C2, C4, C9, M4, M8, O6, O7 y O8 aunque incrementen las variables Valor Agregado o Relacionamento Institucional, conforme los valores propuestos en aquí, su indicador Socioeconómico aumenta pero continúa siendo inferior a 0,5 en todos los casos.

En el caso de las tres fincas de Chaparral (C2, C4, C9) se resalta que son las de localización más remota de las veintiséis analizadas por lo que el acceso a Servicios Básicos, Educación, Salud y Asistencia técnica es precario, además dificulta la disposición adecuada de Residuos Sólidos y la disponibilidad de Mano de Obra, además de la distancia las condiciones de transporte hace que sacar grandes volúmenes de producción para comercializar sea difícil y costoso (una parte del camino es travesía que debe hacerse caminando o en bestia). Como estas fincas venden el grano en seco sin ningún tipo de transformación cuando le venden al intermediario, ubicado generalmente en la cabecera municipal, aceptan el precio que estén dispuestos a pagarles para no devolverse con la producción a la finca.

Los productores de C4 y C9 la mayor parte del tiempo permanecen solos en la finca y únicamente ellos realizan las labores de su cultivo. El productor C2 aunque vive con sus padres (edades de más de 70 años) y un tío (60 años) en condición de discapacidad por lo tanto la responsabilidad económica de los 4 miembros del hogar recae exclusivamente sobre el productor.

En las fincas M4 y M8 agregarle valor al producto o mejorar el Relacionamento Institucional tampoco son medidas suficientes para aumentar el indicador Socioeconómico por encima de 0,5. En el caso de M4, al momento de la entrevista se destacan como limitantes la edad del productor (75 años), que junto a su esposa son la única mano de obra familiar, la asociación estaba recién organizada formalmente (menos de 2 años), la lejanía del lote de cacao respecto a la vivienda del productor y el punto de comercialización del grano que dificultan el acceso a asistencia técnica gratuita, aunque es posible llegar sólo con vehículo automotor, es decir, sin necesidad de hacer travesía o emplear vehículo de tracción animal.

En M8 se resalta que es un productor adulto (55 años) con buena vitalidad para el trabajo en campo sin embargo sus años de experiencia en el cultivo son relativamente pocos para la duración del ciclo productivo del cultivo, se ha capacitado poco en el mismo y no cuenta con Asistencia Técnica, además la mayor parte del tiempo de trabajo el productor se lo dedica al sistema productivo de Panela, por lo que el tiempo que dedica al cultivo de cacao es mínimo pese a que este es intensivo en el uso de mano de obra. Tanto en M4 como en M8 el cultivo no cuenta con riego aunque lo requiera lo que afecta negativamente el componente de Gestión Ambiental.

La productora de la finca O6 (76 años) y el productor de la finca O8 (64 años) viven solos en sus fincas por lo que realizan las labores del cultivo a medida de sus posibilidades, en el caso de O8 viaja por períodos de tiempo de varios días para hacerse chequeos médicos en Bogotá por lo que en ese tiempo el cultivo no recibe ningún tipo de atención.

El productor de O7 (44 años) tiene conyugue pero no participa directamente en las labores del cultivo porque se ocupa de las tareas domésticas y al cuidado de sus hijos (de 2,5 y 5 años), el productor trabaja como jornalero en otras fincas para poder sostener los gastos del hogar, entonces la mano de obra para el cultivo de cacao es limitada.

En los casos de las tres fincas de Ortega se destaca que solo hay una persona disponible para realizar las labores del cultivo, pero no tienen dedicación exclusiva y tampoco contratan mano de obra externa.

Conclusión del Capítulo

El MBA diseñado empíricamente para el sistema Socioeconómico y alimentado con datos reales de las fincas analizadas, demostró ser una herramienta útil para modelar la complejidad que caracteriza los sistemas agrícolas, representar la realidad particular de cada uno y respaldar los procesos de toma de decisiones al permitir evaluar los efectos de política o de manejo del productor.

Si bien en este caso solo se modeló el subsistema Socioeconómico, se sugiere que el mismo pueda seguir siendo alimentado con información de otros elementos que configuran los sistemas de producción de cacao a fin de visualizar y evaluar la diversidad de relaciones que emergen de la relación sociedad-naturaleza en la producción agrícola.

CONCLUSIONES

El modelo resultante para calcular el indicador de complejidad del sistema de producción integra información científica y documentada, conocimiento experto en agronomía del cacao y tecnologías de la información, y conocimiento detallado del contexto socioeconómico y de las prácticas de beneficio de cada finca. Los datos de campo se usaron para efectuar la calibración y validación del modelo propuesto y para constatar la hipótesis de que los sistemas de producción cacao son complejos, no solo por la cantidad de elementos que en estos intervienen sino por la diversidad de interacciones que entre estos ocurren, que conducen a complejidad creciente, por lo cual el uso de técnicas de inteligencia artificial, específicamente lógica difusa en complemento con modelación basada en agentes, consiguen retratar la realidad y abordar su complejidad.

Cruzando la información ofrecida por los productores con la obtenida durante la georreferenciación en campo, se evidencia que algunos productores incluso desconocen la vereda donde están localizados sus cultivos, por lo que incorporar conocimiento científico existente, así como transformar los datos generados por algunos programas de fomento e investigaciones anteriores en información, puede llevar a capitalizar los resultados de las investigaciones en las que los productores participan a fin de que ellos se empoderen de los mismos y los empleen para soportar sus procesos de toma de decisiones, lo que puede ser de gran valor principalmente en las zonas donde predominan los productores que toman decisiones basados exclusivamente en la experiencia y el conocimiento tradicional.

El Sistema de Inferencia Difuso (FIS) generado se basa en el conocimiento experto de dos maneras: en primer lugar, para diseñar las funciones a partir de las que se transforman los datos brutos en grados de satisfacción y en segundo lugar, para establecer las conclusiones de las reglas. La herramienta resultante es eficiente para triangular métodos de investigación al integrar datos cuantitativos y cualitativos, provenientes de diferentes fuentes y medidos en diferentes escalas como valoraciones subjetivas realizadas por expertos de diferentes áreas (un agrónomo, un economista y agricultores) y registros de campo así como resultados de laboratorio cuyos datos pueden estar en (%), (mg/kg), (meq/100g), etc.

El resultado del FIS es fácil de interpretar ya que permite clasificar los resultados en orden creciente y explorar los resultados intermedios para identificar las causas que limitan

el indicador final de cada fase de la estructura jerárquica sobre la que se representa el sistema de producción de cacao, siendo esta una ventaja adicional de FIS frente a otras técnicas de inteligencia artificial como las redes neuronales, que solo producen un resultado final. De manera que es posible verificar que las variables de salida son consistentes con el comportamiento real del sistema, permitiendo ajustar el modelo como un todo o en cada una de sus fases.

Si bien los FIS requieren definir muchos parámetros para delimitar las particiones de entrada y los operadores de inferencia, en el caso particular de la agregación de las variables de entrada al estar en grados satisfacción, con una escala y significado común, la configuración de las entradas utilizando una partición difusa fuerte con dos términos lingüísticos, Bajo y Alto, es automática. En consecuencia, el modelo propuesto puede ser empleado para los demás países de América Latina, que tienen condiciones socioeconómicas y agroambientales similares, y sólo las conclusiones de las reglas deben ser definidas específicamente por el usuario. Para otras zonas productoras de cacao, como África, el índice propuesto también puede ser utilizado toda vez que es un sistema abierto en el que restricciones pueden ser agregadas o eliminadas para adaptarse fácilmente a los contextos locales.

El modelo del subsistema Suelo-Cultivo proporciona una evaluación realista de la productividad del suelo y del cultivo que puede contribuir para que los agricultores puedan comprender mejor cómo los rendimientos del cacao dependen de sus decisiones de manejo sobre el suelo y el cultivo. Además, al estar basado en GIS, permite mayor precisión, monitoreo continuo, afinación del sistema y mayor productividad. Por lo menos con los datos empleados se evidencia que aunque las fincas de Mariquita tienen mayor restricción en las condiciones de suelo, explicada principalmente por condiciones físicas poco aptas para el cultivo de cacao, esa zona presenta una mejor relación Suelo-Cultivo que las fincas de Ortega y Chaparral, este comportamiento se debe a un mejor desempeño en las variables de manejo del cultivo y de las condiciones químicas del suelo asociadas principalmente a la fertilización.

Aunque la investigación predominante asociada al cultivo de cacao se ha concentrado en áreas agroambientales se halló que las causas estructurales de la limitada complejidad de los sistemas de producción de cacao radican en las condiciones socioeconómicas, con

indicadores promedio para este subsistema inferiores a 0,48 en Chaparral y Ortega y a 0,55 en Mariquita, lo que refleja la necesidad imperante de aumentar la inversión social en la zonas productoras de grano para contribuir al desarrollo de los sistemas de producción de cacao, toda vez que la prioridad de estos debería ser la calidad de vida de los productores. Asimismo trabajar en el fortalecimiento del tejido social de dichas zonas y de las unidades producción de cacao es menester.

El modelo del subsistema Calidad de Cacao integra la evaluación de las condiciones fisicoquímicas del grano conforme la NTC 1252 con la evaluación subjetiva y sensorial del licor, además de evaluar las prácticas de beneficio que desarrollan los agricultores, los resultados muestran que a pesar del potencial del departamento para producir cacao que pueda ser comercializado dentro de nichos especializados, como el de cacaos finos y de aroma, mientras el mercado no reconozca los esfuerzos adicionales vía beneficios directos a los productores difícilmente ellos ajustarán sus prácticas de beneficio a fin de participar en dicho segmento del mercado, por ahora, los resultados promedios en las tres zonas fueron inferiores a 0,5 siendo levemente menor en Ortega y con la mayor heterogeneidad entre fincas, mientras que los resultados más homogéneos se presentan en Mariquita.

Tanto en el caso del subsistema Socioeconómico como en el de Calidad del Cacao que emplean variables de entrada producto de la autoevaluación de las actividades de los productores, como por lo menos la condiciones de transporte o las prácticas de beneficio, puede incurrirse en un sesgo de la información, porque los productores no necesariamente desarrollan las actividades como sugiere la teoría sino como se lo permiten el tiempo, el dinero y la disponibilidad de mano de obra o herramientas, por lo tanto, para una mayor aproximación a la realidad se torna necesario hacer un seguimiento durante un intervalo de tiempo de al menos un año en cada finca para confirmar como los productores llevan a cabo dichas labores.

Aunque la interfaz de Netlogo es de fácil manejo para el usuario final, se resalta que la MBA en dicha plataforma exige definir una amplia y específica base de reglas para que el modelo sea sensible a pequeños cambios en las variables de entrada, por lo tanto, para llegar a resultados similares a los generados a través de lógica difusa se requiere mayor destreza en programación, lo que puede dificultar la implementación de estas técnicas por parte de los tomadores de decisiones.

Tanto GeoFIS como Netlogo permiten identificar los factores que influyen en la variable de salida, eso facilita proponer y evaluar estrategias de adaptación según las condiciones y necesidades de cada tipo de sistema de producción. Por lo tanto, el modelo propuesto permite monitorear y medir los cambios en las funciones del suelo y el cultivo, en las condiciones socioeconómicas y las prácticas de beneficio, lo cual es esencial para predecir los efectos de decisiones de manejo y el impacto de perturbaciones externas provocadas por cambios en el clima, política o mercado, luego puede ser de gran utilidad para quienes diseñan estrategias de adaptación y quienes toman ese tipo de decisiones.

Los FIS y la MBA gracias a su proximidad con el lenguaje natural y el razonamiento experto son un buen marco alternativo para modelado de preferencias y toma de decisiones multicriterio gracias a la integración de información cualitativa y cuantitativa, para el análisis de las relaciones socioeconómicas implícitas en los sistemas agrícolas bajo un enfoque interdisciplinario y transdisciplinario a nivel micro y macro. Por lo tanto se espera que estas técnicas sean usadas con mayor frecuencia para apoyar los procesos de toma de decisiones y el diseño de políticas públicas agrícolas que trasciendan de las estructuras agrícolas locales a las de nivel superior, sin embargo, esto requerirá una mayor inversión de tiempo y dinero por parte de los formuladores de políticas.

Finalmente se espera que los resultados de esta investigación puedan ser convertidos en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones de productores, planificadores del uso del suelo, asistentes técnicos e investigadores, que contribuya a disminuir el riesgo de pérdidas de recursos humanos, naturales y económicos, por el establecimiento de nuevos sitios o renovación de siembra en zonas donde la complejidad del Sistema de Producción de cacao puede estar limitada por factores de suelo, de infraestructura logística o de entrenamiento en el manejo del cultivo, la cosecha y la pos cosecha.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, P. C., Benjamin, T. J., Burniske, G. R., Croft, M. M., Fenton, M., Kelly, C. R., Lundy, M., Rodriguez Camayo, F., & Wilcox Jr., M. D. (2018). *Análisis de la cadena productiva de cacao en Colombia*.
- Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., & Ryan, A. (2008). Flavor formation and character in cocoa and chocolate: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(9), 840–857. <https://doi.org/10.1080/10408390701719272>
- Aguilera Ontiveros, A., & Posada Calvo, M. (2018). *Introducción al modelado basado en agentes. Una aproximación desde NetLogo* (1a ed.).
- Alcaldía de Chaparral-Tolima. (2018). *Municipio de Chaparral*. Mi Municipio/Información Del Municipio. <http://www.chaparral-tolima.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Alcaldía de Ortega-Tolima. (2017). *Mi Municipio*. Información Del Municipio. <http://www.ortega-tolima.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Amézaga, C., Rodríguez, D., Núñez, M., & Herrera, D. (2013). *Orientaciones Estratégicas para el Fortalecimiento de la gestión asociativa*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Amini, S., Rohani, A., & Hossein, M. (2020). Assessment of land suitability and agricultural production sustainability using a combined approach (Fuzzy-AHP-GIS): A case study of Mazandaran province , Iran. *Information Processing in Agriculture*, 7(3), 384–402. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.10.001>
- Amorim Homem de Abreu Loureiro, G., Reis de Araujo, Q., René-Valle, R., Andrade-Sodré, G., & Moreira de Souza, S. M. (2017). Influencia de factores agroambientales sobre la calidad del clon de cacao (*Theobroma cacao* L.) PH-16 en la región cacaotera de Bahia, Brasil. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 579. <https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1274>
- Amouroux, E., Chu, T. Q., Boucher, A., & Drogoul, A. (2009). GAMA: An environment for implementing and running spatially explicit multi-agent simulations. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5044 LNAI, 359–371. <https://doi.org/10.1007/978-3->

642-01639-4_32

- APPCACAO. (2018). *Cadena de valor del cacao: evidencias científicas y desafíos normativos frente a la cuestión del cadmio*.
- Arboleda, R., & González, A. (2010). *Análisis socioeconómico del sector cacaotero colombiano*.
- Arevalo, M., Delgado, T., Maroto, S., Rivera, J., Higuera, I., & Navarro, A. (2016). *Estado actual sobre la producción y el comercio del cacao en América*.
- Arthur, A.; Afrifa, A.A; Dogbatse, J. A. (2017). Assessment of Soil Fertility Status of Cocoa Farms Around the Ankasa National Park in the Jomoro District of the Western Region of Ghana. *International Symposium on Cocoa Research (ISCR)*, Cd, 1–29. www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/cat_view/68-icco-workshops-and-seminars/352-international-cocoa-research-symposium-lima-peru-2017/438-proceedings-of-the-international-symposium-on-cocoa-research-2017/440-thematic-2.html
- Asseng, S., Dray, A., Perez, P., & Su, X. (2010). Rainfall-human-spatial interactions in a salinity-prone agricultural region of the Western Australian wheat-belt. *Ecological Modelling*, 221(5), 812–824. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.12.001>
- Bancoldex. (2014). *Métodos de cálculo de los indicadores de complejidad*.
- Barreto, C. L. (2012). *La red de política en el subsector cacaotero en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Beg, M. S., Ahmad, S., Jan, K., & Bashir, K. (2017). Status, supply chain and processing of cocoa - A review. *Trends in Food Science and Technology*, 66, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.007>
- Berger, T. (2001). Agent-based spatial models applied to agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, 25(2–3), 245–260. [https://doi.org/10.1016/S0169-5150\(01\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0169-5150(01)00082-2)
- Bert, F. E., North, M., Rovere, S., Tatara, E., Macal, C., & Podestá, G. (2015). Simulating agricultural land rental markets by combining agent-based models with traditional economics concepts: The case of the Argentine Pampas. *Environmental Modelling and Software*, 71, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.05.005>
- Bert, F. E., Podestá, G. P., Rovere, S. L., Menéndez, Á. N., North, M., Tatara, E., Laciana,

- C. E., Weber, E., & Toranzo, F. R. (2011). An agent based model to simulate structural and land use changes in agricultural systems of the argentine pampas. *Ecological Modelling*, 222(19), 3486–3499. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.08.007>
- Bichraoui-Draper, N., Xu, M., Miller, S. A., & Guillaume, B. (2015). Agent-based life cycle assessment for switchgrass-based bioenergy systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.003>
- Boff, L. (1996). *Ecología: grito de la tierra, grito de los pobres* (M. Editorial Trotta (Ed.); 1st ed.).
- Bommel, P., Becu, N., Le Page, C., & Bousquet, F. (2016). Cormas: An Agent-Based Simulation Platform for Coupling Human Decisions with Computerized Dynamics. In T. Kaneda, H. Kanegae, Y. Toyoda, & P. Rizzi (Eds.), *Simulation and Gaming in the Network Society* (pp. 387–410). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0575-6_27
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 Suppl 3(suppl 3), 7280–7287. <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- Botero, E. A. (2017). Análisis del perfil competitivo de la cadena productiva del cacao en el departamento de Arauca. *Equidad & Desarrollo*, 27, 37–53. <https://doi.org/10.19052/ed.3663>
- Burin, D. (2017). *Manual de Facilitadores de Procesos de Innovación Comercial*.
- Bustos M., J. R. (2005). Inteligencia Artificial en el sector agropecuario. In *Seminario de Investigación I* (Vol. 2). <http://www.docentes.unal.edu.co/jrbustosm/docs/estado2.pdf>
- Cadena productiva de cacao sur del Tolima. (2016). *Términos Alianza Publico Privada Tolima Cacao*.
- Campo, J., & Herrera, J. P. (2012). *Estudio del sector cacaotero en Colombia* (No. 3; Estudios Económicos Sectoriales).
- CAOBISCO/AEC/FCC. (2015). Cacao en Grano: Requisitos de Calidad de la Industria del Chocolate y del Cacao. In *End, M.J. and Dand, R., Editors* (Vol. 69, Issue 12). [http://www.cocoaquality.eu/data/Cacao en Grano Requisitos de Calidad de la Industria Apr 2016_es.pdf](http://www.cocoaquality.eu/data/Cacao%20en%20Grano%20Requisitos%20de%20Calidad%20de%20la%20Industria%20Apr%202016_es.pdf)

- Cardona, L. M. (2016). *Influencia del proceso de fermentación sobre las características de calidad del grano de cacao (Theobroma cacao)*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59884>
- Castilla-Rho, J. C., Mariethoz, G., Rojas, R., Andersen, M. S., & Kelly, B. F. J. (2015). An agent-based platform for simulating complex human-aquifer interactions in managed groundwater systems. *Environmental Modelling and Software*, 73, 305–323. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.018>
- Castillo-Villanueva, L., & Velázquez-Torres, D. (2015). Sistemas complejos adaptativos, sistemas socio- ecológicos y resiliencia. *Año*, 17(2), 11–32. <http://www.redalyc.org/pdf/401/40143424002.pdf>
- Chávez-Malgiaritta, R. (2017). Gestión de Cadenas de Valor Sostenibles para productos de exportación. In *Congreso de Comercio Exterior y negocios internacionales 2017*.
- Clavijo, M. A., & Ardila, P. A. (2015). *Eficiencia Económica en la Producción de Cacao en Rionegro-Santander*.
- Comisión Europea. (2014). Statement on tolerable weekly intake for cadmium. *Diario Oficial de La Unión Europea*, No 488/2014. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.1975>
- Contreras, C. (2017). *Análisis de la cadena de valor del cacao en Colombia: generación de estrategias tecnológicas en operaciones de cosecha y poscosecha, organizativas, de capacidad instalada y de mercado*.
- Coulon-Leroy, C., Charnomordic, B., Thiolllet-Scholtus, M., & Guillaume, S. (2013). Imperfect knowledge and data-based approach to model a complex agronomic feature - Application to vine vigor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.09.010>
- Cubillos, G., Merizalde, G., & Correa, E. (2008). Manual De Beneficio Del Cacao 2008. *Secretaria de Agricultura de Antioquia*, 17. https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2018/05/manual_beneficio_cacao.pdf%0Ahttps://www.chocolates.com.co/wp-content/uploads/2018/05/manual_beneficio_cacao.pdf
- Data fusion - GeoFIS. (n.d.). Retrieved April 12, 2020, from <https://www.geofis.org/en/documentation-en/data-fusion/>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2016). *Censo Nacional Agropecuario 2014*. Tercer Censo Nacional Agropecuario - 2014 -3er CNA.

http://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/MICRODATOS/about_collection/30/3

- Duan, X. wu, Xie, Y., Feng, Y. jie, & Yin, S. qing. (2009). Study on the Method of Soil Productivity Assessment in Black Soil Region of Northeast China. *Agricultural Sciences in China*, 8(4), 472–481. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(08\)60234-5](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60234-5)
- Duan, X. wu, Xie, Y., Ou, T., & Lu, H. (2011). Effects of soil erosion on long-term soil productivity in the black soil region of northeastern China. *Catena*, 87(2), 268–275. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.06.012>
- Durston, J. (2000). Qué es el capital social? *Revista de La CEPAL*, 69, 45.
- Elizalde, P. Ó. A. (2013). Aproximación a las ciencias de la complejidad. *Revista de La Universidad de La Salle*, 61, 45–66. <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1370&context=ruls>
- Espinal, C. F., Martínez, H. J., & Ortíz, L. (2005). *La cadena del cacao en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005* (No. 58; Agrocadenas, Issue 58).
- Fedecacao, F. N. D. C. (2004). *El beneficio y características físico químicas del cacao (Theobroma cacao L.)*. <http://www.fedecacao.com.co/site/index.php/1publicaciones>
- Federación Nacional de Cacaoteros. (2017, January 31). *Los precios del cacao bajan por factores externos....* <http://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/noticias/324-los-precios-del-cacao-bajan-por-factores-externos>
- Federación Nacional de Cacaoteros. (n.d.). *Economía Nacional*. Retrieved April 19, 2020, from <http://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/2015-02-12-17-20-59/nacionales>
- Ferraro, D. O. (2009). Fuzzy knowledge-based model for soil condition assessment in Argentinean cropping systems. *Environmental Modelling and Software*, 24(3), 359–370. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.07.006>
- García-cáceres, R. G., Perdomo, A., Ortiz, O., Beltrán, P., & López, K. (2014). *Characterization of the supply and value chains of Colombian cocoa Caracterización de las cadenas de abastecimiento y valor del cacao en Colombia*. 81(187), 30–40.
- Garcia Lozano, J., Arguello, A. L., Mantilla, J., Ramirez Chamorro, L. E., Vergel Manzano,

- L., Figueroa, L., & Ortiz Ortiz, L. A. (2006). *Caracterización y tipificación socioeconómica y tecnológica del sistema de producción de cacao en Colombia*.
- García, R. (2011). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. *Revista Latinoamericana de Metodología de Las Ciencias Sociales*, 1, 66–101.
http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/%0Aart_revistas/pr.4828/pr.4828.pdf
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125–138.
- Gibon, A., Sheeren, D., Monteil, C., Ladet, S., & Balent, G. (2010). Modelling and simulating change in reforestation mountain landscapes using a social-ecological framework. *Landscape Ecology*, 25(2), 267–285. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9438-5>
- Gobernación del Tolima. (2015a). *Estadísticas 2011-2014. Chaparral*.
<https://www.tolima.gov.co/documentos/826/estadisticas-tolima-2011-2014/?genPagDocs=1>
- Gobernación del Tolima. (2015b). *Estadísticas 2011-2014. Mariquita*.
<https://www.tolima.gov.co/documentos/826/estadisticas-tolima-2011-2014/?genPagDocs=3>
- Gobernación del Tolima. (2015c). *Estadísticas 2011-2014. Ortega*.
<https://www.tolima.gov.co/documentos/826/estadisticas-tolima-2011-2014/?genPagDocs=3>
- Gómez-García Palao, R., & Vignati, F. (2016). *Iniciativa Latinoamericana del cacao*. CAF.
<https://scioteca.caf.com/handle/123456789/892>
- Gómez, G. L. F. (2015). *Metodología para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático de hogares rurales de corregimientos de ladera de cali utilizando lógica difusa*.
- Gonzalez, A. (2015). *Valoración de la Sustentabilidad de los Policultivos Cafeteros del Centro Occidente y Sur Occidente Colombiano*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.
- Grupo de Investigación Análisis Sensorial. (2019). *Reporte de resultado licor de cacao*.
- Gu, Z., Xie, Y., Gao, Y., Ren, X., Cheng, C., & Wang, S. (2018). Quantitative assessment of soil productivity and predicted impacts of water erosion in the black soil region of northeastern China. *Science of the Total Environment*, 637–638, 706–716.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.061>
- Guillaume, S., & Charnomordic, B. (2012). Fuzzy inference systems: An integrated modeling environment for collaboration between expert knowledge and data using FisPro. *Expert Systems with Applications*, 39(10), 8744–8755. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.206>
- Guzmán, A. P., Gutiérrez, C. D., & Oliveros, D. (2016). Análisis mundial de la cadena de valor del cacao. *I+D Revista de Investigaciones*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.19052/ed.3663>
- Happe, K., Balmann, A., & Kellermann, K. (2004). *The Agricultural Policy Simulator (AgriPolis) - An Agent-Based Model to Study Structural Change in Agriculture* (No. 71). January 2004, 48. <https://www.econstor.eu/handle/10419/28492>
- Helbing, D. (Ed.). (2012). *Social Self-Organization*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24004-1>
- Homann, F. (2016). *Fine cocoa market dynamics -- bid for the future*. https://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/cat_view/290-world-cocoa-conference-2016-bavaro/291-presentations-world-cocoa-conference-bavaro-2016/293-fine-and-flavour-cocoa-forum-at-wcc3.html
- ICONTEC. (2003). *Norma Técnica Colombiana 1252*.
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2012). *Manejo Fitosanitario del Cultivo del Cacao (Theobroma cacao L.) - Medidas para la Temporada Invernal*. <https://www.ica.gov.co/getattachment/c01fa43b-cf48-497a-aa7f-51e6da3f7e96/->
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2014). *Manual de capacitación: agregación de valor a productos de origen agropecuario: elementos para la formulación e implementación de políticas públicas* (M. G. Marvin Blanco, Luis Morán, Hernando Riveros & W. Heinrichs (Eds.)).
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2017). *Cacao en américa*. repositorio.iica.int/bitstream/11324/6422/1/BVE18019631e.pdf
- International Cocoa Organization. (2015). *Fourth Meeting of the ICCO Ad Hoc Panel on Fine or Flavour Cocoa To Review Annex “C” of the International Cocoa Agreement, 2010* (FFP 4-5 Report of Meeting: Panel 2015). <https://www.icco.org/about-cocoa/fine-or-flavour-cocoa.html>

- Jorge Alejandro, D.-A., Jorge Luis, O.-M., & Elvia, R.-B. (2013). Solución al problema de desacoplamiento mediante un controlador proporcional difuso de un sistema regular de riego con tuberías en paralelo. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(4), 523–536. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(13\)72263-7](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(13)72263-7)
- Kelting, D. L., Burger, J. A., Patterson, S. C., Aust, W. M., Miwa, M., & Trettin, C. C. (1999). Soil quality assessment in domesticated forests - A southern pine example. *Forest Ecology and Management*, 122(1–2), 167–185. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00040-7)
- Kongor, J. E., Felix Takrama, J., Simpson Budu, A., Mensah-Brown, H., & Afoakwa, E. O. (2013). Effects of Fermentation and Drying on the Fermentation Index and Cut Test of Pulp Pre-conditioned Ghanaian Cocoa (*Theobroma cacao*) Beans. *Journal of Food Science and Engineering*, 3(December 2014), 625–634.
- Kongor, J. E., Hinneh, M., de Walle, D. Van, Afoakwa, E. O., Boeckx, P., & Dewettinck, K. (2016). Factors influencing quality variation in cocoa (*Theobroma cacao*) bean flavour profile - A review. *Food Research International*, 82, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.012>
- Kremmydas, D., Athanasiadis, I. N., & Rozakis, S. (2018). A review of Agent Based Modeling for agricultural policy evaluation. *Agricultural Systems*, 164(October 2017), 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.03.010>
- Lara-Rosano, F. de J., López Ortega, E., Almanza Márquez, S. I., Téllez Ballesteros, S. C., Huerta Barrientos, A., Fernández de Velazco, F., López Cuachayo, M. A., Velázquez-Guzmán, M. G., Ruiz Coronel, A., Córdova Aquino, R. H., Carrión García, P., Gallardo Cano, A., Lara Velázquez, R., & Escobar Castañeda, A. (2017). *Aplicaciones de las ciencias de la complejidad al diagnóstico e intervención en problemas sociales* (F. de J. Lara-Rosano (Ed.)). Colofón, S.A. de C.V.
- Lardy, R., Mazzega, P., Sibertin-Blanc, C., Auda, Y., Sanchez-Perez, J. M., Sauvage, S., & Therond, O. (2014). Calibration of simulation platforms including highly interweaved processes: The MAELIA multi-agent platform. *Proceedings - 7th International Congress on Environmental Modelling and Software: Bold Visions for Environmental Modeling, IEMSs 2014*, 2(August), 658–665.
- Larios González, R. C. (2014). *Fertilidad del Suelo Bajo Prácticas Agroecológicas y*

- Manejo Convencional en el Cultivo de Café, Nicaragua 2009-2010* [Universidad Nacional Agraria]. <http://repositorio.una.edu.ni/2776/1/tnp35l323f.pdf>
- Le, Q. B., Park, S. J., & Vlek, P. L. G. (2010). Land Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system. 2. Scenario-based application for impact assessment of land-use policies. *Ecological Informatics*, 5(3), 203–221. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.02.001>
- Le, Q. B., Park, S. J., Vlek, P. L. G., & Cremers, A. B. (2008). Land-Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system. I. Structure and theoretical specification. *Ecological Informatics*, 3(2), 135–153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2008.04.003>
- Leroux, C., Jones, H., Pichon, L., Guillaume, S., Lamour, J., Taylor, J., Naud, O., Crestey, T., Lablee, J.-L., & Tisseyre, B. (2018). GeoFIS: An Open Source, Decision-Support Tool for Precision Agriculture Data. *Agriculture*, 8(6), 73. <https://doi.org/10.3390/agriculture8060073>
- Lima, L. J. R., Almeida, M. H., Rob Nout, M. J., & Zwietering, M. H. (2011). Theobroma cacao L., “the food of the gods”: Quality determinants of commercial cocoa beans, with particular reference to the impact of fermentation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(8), 731–761. <https://doi.org/10.1080/10408391003799913>
- Liu, X., Herbert, S. J., Hashemi, A. M., Zhang, X., & Ding, G. (2006). Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation - A review. *Plant, Soil and Environment*, 52(12), 531–543. <https://doi.org/10.17221/3544-pse>
- Lobianco, A., & Esposti, R. (2010). The Regional Multi-Agent Simulator (RegMAS): An open-source spatially explicit model to assess the impact of agricultural policies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72(1), 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.02.006>
- López-Roldán, P., & Fachelli, S. (2015). Metodología De La Investigación Social Cuantitativa. *Metodología De La Investigación Social Cuantitativa*, 4–41. <http://ddd.uab.cat/record/129382>
- Machado Cuellar, L., Ordoñez Espinosa, C. M., Angel Sánchez, Y. K., Guaca Cruz, L., &

- Suárez Salazar, J. C. (2018). Evaluación de la calidad organoléptica de *Theobroma cacao* L. en fincas cacaoteras en el norte de Huila, Colombia. *Acta Agronomica*, 67, 46–52. <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v67n1/0120-2812-acag-67-01-00046.pdf>
- Maldonado, C. E. (1999). Esbozo de una filosofía de la lógica de la complejidad. In C. E. Maldonado (Ed.), *Visiones sobre la complejidad* (pp. 9–27). Colección “Filosofía y ciencia.” <https://formacionsocial.iteso.mx/documents/10901/0/01+-+Maldonado,CE+Visiones+sobre+la+complejidad.pdf/18abd039-817d-44c5-b43e-c138f9144106>
- Maldonado, C. E. (2014). ¿Qué es un sistema complejo? *Revista Colombiana de Filosofía de La Ciencia*, 14, 71–93. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41438646004>
- Maldonado, C. E., & Gómez-Cruz, N. A. (2010). *El mundo de las ciencias de la complejidad: un estado del arte* (Universidad del Rosario (Ed.); 1st ed., Issue 76). <https://www.urosario.edu.co/Administracion/ur/Investigacion/Centro-de-Estudios-Empresariales-para-la-Perdurabi/LMyS/Documentos/El-Mundo-de-las-Ciencias-de-la-Complejidad.pdf>
- Medina, J. I. G. V. (2011). La simulación basada en agentes: Una nueva forma de explorar los fenómenos sociales. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 136, 91–110. <https://doi.org/10.5477/cis/reis.136.91>
- Mialhe, F., Becu, N., & Gunnell, Y. (2012). An agent-based model for analyzing land use dynamics in response to farmer behaviour and environmental change in the Pampanga delta (Philippines). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 161, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.07.016>
- Miedes Ugarte, B. (2012). *COMPLEJIDAD Y ECONOMÍA: DISTINTAS CORRIENTES DE PENSAMIENTO, DIVERSAS LECTURAS*.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2016). Estrategia Colombia Siembra. In *Madr* (Vol. 1). http://www.corpoica.org.co/SitioWeb/Archivos/Foros/caracterizacion_citricos1.pdf
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Cadena de Cacao. In *Dirección de cadenas agrícolas y forestales*. https://sioc.minagricultura.gov.co/Cacao/Documentos/2021-03-31_CifrasSectoriales.pdf
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. (2018). *Agronet*.

- <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=3#>
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural. (2019). *Siembra*.
<http://www.siembra.gov.co/Home/Busqueda?tipo=0&categoria=1&query=cacao+reportes>
- Ministerio de Hacienda y Crédito Público de Colombia. (2017). *Presidencia de la República de Colombia*. Decreto 1650 de 2017.
http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO_1650_DEL_09_DE_OCTUBRE_DE_2017.pdf
- Mite, F., Carrillo, M., & Durando, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas de ecuador. *XII Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo*, November, 17–19.
https://www.researchgate.net/publication/304346639_AVANCES_DEL_MONITOREO_DE_PRESENCIA_DE_CADMIO_EN_ALMENDRAS_DE_CACAO_SUELOS_Y_AGUAS_EN_ECUADOR
- Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., & Eibl, B. (2015). Sistemas Agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. In *Sistemas agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (Issue 6).
- Moreno-martínez, E., Gavanzo-cárdenas, Ó. M., & Rangel-silva, F. A. (2019). *Evaluación de las características físicas y sensoriales de licor de cacao asociadas a modelos de siembra*. 16(3), 0–2.
- Moriello, S. (2005). *Sistemas Complejos, Caos Y Vida Artificial*.
- Moriello, S. (2006). Dinámica de los Sistemas Complejos. In *Comunidad de Pensamiento Complejo*. [http://www.pensamientocomplejo.com.ar/docs/files/Moriello_Dinamica de los Sistemas Complejos.pdf](http://www.pensamientocomplejo.com.ar/docs/files/Moriello_Dinamica_de_los_Sistemas_Complejos.pdf)
- Morin, E. (1994). *Introduccion al pensamiento complejo*.
<https://www.sedh.gob.hn/documentos-recientes/203-introducción-al-pensamiento-complejo/file>
- Muñoz, A. M. (2002). Sensory evaluation in quality control: An overview, new developments and future opportunities. *Food Quality and Preference*, 13(6), 329–339.
[https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(02\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(02)00014-9)
- North, M. J., Collier, N. T., & Vos, J. R. (2006). Experiences creating three

- implementations of the repast agent modeling toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 16(1), 1–25. <https://doi.org/10.1179/174963006X99394>
- Nutri-Tech Solutions. (2007). Phil Callahan Soil Meter. *PCSM -Phil Callahan Soil Meter*, 7–8. www.pikeagri.com
- Obando, B. J. A. (2015, July 31). *Las escalas Likert y el análisis de correspondencias*. <https://www.ucc.edu.co/prensa/2015/Paginas/escalas-Likert-y-el-analisis-de-correspondencias.aspx>
- Olmedo, E., Valderas, J. M., & Mateos de Cabo, R. (2004). La economía en el marco de la ciencia compleja. *Encuentros Multidisciplinarios*, 17, 6. [http://www.encuentros-multidisciplinares.org/Revistan%BA17/Elena Olmedo - Juan M Valderas y Ruth Mateos.pdf](http://www.encuentros-multidisciplinares.org/Revistan%BA17/Elena%20Olmedo%20-%20Juan%20M%20Valderas%20y%20Ruth%20Mateos.pdf)
- ONU. (2015). Objetivo 6. Agua Limpia Y Saneamiento: Por Que Es Importante. *Sustainable Development Goals*, 1–2. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6_Spanish_Why_it_Matters.pdf
- Ossa, O. C. A. (2016). Teoría general de sistemas : conceptos y aplicaciones. In *Colección Textos Académicos Facultad Ciencias Ambientales UTP*. <http://hdl.handle.net/11059/7424>
- Pavón, M. J., López, P. A., & Galán, O. J. M. (2012). *Modelado basado en agentes para el estudio de sistemas complejos*. 13–18. <https://core.ac.uk/reader/61547420>
- Peche, R., & Rodríguez, E. (2012). Development of environmental quality indexes based on fuzzy logic. A case study. *Ecological Indicators*, 23, 555–565. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.04.029>
- Perdomo, M. A. (2012). *Caracterización de la cadena de abastecimiento y la cadena de valor del cacao en Colombia*.
- Perona, E. (2005). Ciencias de la complejidad: ¿La economía del siglo XXI? *Apuntes Del CENES*, 25(40), 27–54.
- Pettersson, E. (2016). *Sustainability evaluations and development challenges of cacao farms*. Örebro University.
- Phan, C. H., Huynh, H. X., & Drogoul, A. (2010). An agent-based approach to the simulation of Brown Plant Hopper (BPH) invasions in the Mekong Delta. *2010 IEEE-*

- RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies: Research, Innovation and Vision for the Future, RIVF 2010, May 2014.*
<https://doi.org/10.1109/RIVF.2010.5633134>
- Pinchao Piedrahita, J. S. (2013). *Estimación del potencial productivo del suelo en un cultivo de maíz afectado por salinidad en dos municipios del valle del cauca* [Universidad del Valle].
http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7752/1/TESIS_PPS_y_SALINIDAD.pdf
- Pinzón Useche, J. O. P., Rojas Ardila, J., Rojas, F., Ramírez, Ó. D., Moreno, F., & Antolinez Castro, G. (2012). *Guía Técnica para el Cultivo del Cacao*.
- Quintana Fuentes, L. F., García Jerez, A., & Moreno Martínez, E. (2018). Perfil sensorial de cuatro modelos de siembra de cacao en Colombia. *Entramado*, 14(2), 256–268.
<https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.4756>
- Rincón Ruíz, A., Echeverry-Duque, M. A., Piñeros Q., A. M., Tapia Caicedo, C., David Drews, A., Arias-Arévalo, P., & Zuluaga Guerra, P. A. (2015). *Integrated Valuation of Biodiversity and Ecosystem Services* (I. de I. de R. B. A. von Humboldt (Ed.)).
<http://hdl.handle.net/20.500.11761/9289>
- Rivera, R. D., Barrera Álvarez, A. E., Guzmán Cedeño, Á. M., Medina Quinteros, H. N., Casanova Ferrín, L. M., Peña Galeas, M. M., & Nivela Morante, P. E. (2012). EFECTO DEL TIPO Y TIEMPO DE FERMENTACIÓN EN LA CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DEL CACAO (*Theobroma cacao* L.) TIPO NACIONAL. *Ciencia y Tecnología*, 5(1), 7–12. <https://doi.org/10.18779/cyt.v5i1.77>
- Rodríguez Zoya, L. G., & Roggero, P. (2015). Modelos basados en agentes: aportes epistemológicos y teóricos para la investigación social. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, 60(225), 227–261. [https://doi.org/10.1016/S0185-1918\(15\)30025-8](https://doi.org/10.1016/S0185-1918(15)30025-8)
- Rojas, F., & Sacristán Sánchez, E. J. (2013). *Rojas y Sacristan, 2013*.
https://www.fedecacao.com.co/portal/images/recourses/pub_doctecnicos/fedecacao-pub-doc_05B.pdf
- Romero, P. C. (2003). Paradigma de la complejidad, modelos científicos y conocimiento educativo. *Agora Digital*, 6, 1.

- Sánchez, E. J. (2014). *Economía y complejidad ; algunas implicaciones para el diseño de las políticas de desarrollo internacional y de cooperación . Complexity and the economy : implications for the design of international development and cooperation policies*. https://www.uhu.es/IICIED/pdf/4_13_econom.pdf
- Schoenholtz, S. H., Miegroet, H. Van, & Burger, J. A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138(1–3), 335–356. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)
- Schreinemachers, P., & Berger, T. (2011). An agent-based simulation model of human-environment interactions in agricultural systems. *Environmental Modelling and Software*, 26(7), 845–859. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.004>
- Schuschny, A. R. (2001). *Auto organización en sistemas económicos*.
- Servent, A., Boulanger, R., Davrieux, F., Pinot, M. N., Tardan, E., Forestier-Chiron, N., & Hue, C. (2018). Assessment of cocoa (*Theobroma cacao* L.) butter content and composition throughout fermentations. *Food Research International*, 107(March), 675–682. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.070>
- Snoeck, D., Afrifa, A. A., Ofori-Frimpong, K., Boateng, E., & Abekoe, M. K. (2010). Mapping fertilizer recommendations for cocoa Production in Ghana using soil diagnostic and GIS tools. *West African Journal of Applied Ecology*, 17(September), 97–107.
- Snoeck, D., Koko, L., Joffre, J., Bastide, P., & Jagoret, P. (2016). *Cacao Nutrition and Fertilization* (Lichtfouse E. (Ed.); Vol. 19, pp. 155–202). https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_4
- Soil Science Society of America. (2008). *Soil Science Society of America*. Glossary of Soil Science Terms. <https://www.soils.org/publications/soils-glossary?ssoContinue=1#>
- Stachetti-Rodrigues, G. (Embrapa), & Bruno, A. (Mgap). (2007). *Manual de evaluación de impacto ambiental de actividades rurales*. www.mgap.gub.uy/responsable
- Stenglein, J. L., Gilbert, J. H., Wydeven, A. P., & Van Deelen, T. R. (2015). An individual-based model for southern Lake Superior wolves: A tool to explore the effect of human-caused mortality on a landscape of risk. *Ecological Modelling*, 302, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.01.022>

- Sukha, D. A., Butler, D. R., Umaharan, P., & Boulton, E. (2008). The use of an optimised organoleptic assessment protocol to describe and quantify different flavour attributes of cocoa liquors made from Ghana and Trinitario beans. *European Food Research and Technology*, 226(3), 405–413. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0551-2>
- Swisscontact. (2016). *Desarrollo de la cadena de valor del cacao*. https://issuu.com/swisscontact5/docs/sc_cocoa_promotion_brochure_sp
- Sylvestre, D., Lopez-Ridaaura, S., Barbier, J. M., & Wery, J. (2013). Prospective and participatory integrated assessment of agricultural systems from farm to regional scales: Comparison of three modeling approaches. *Journal of Environmental Management*, 129, 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.001>
- Taillandier, P., Vo, D. A., Amouroux, E., & Drogoul, A. (2012). GAMA: A simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 7057 LNAI, 242–258. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25920-3_17
- Thakur, N., & Sharma, R. (2019). Soil Quality. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(06), 2920–2930. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.806.351>
- The International Cocoa Organization. (2016). *ICCO Panel recognizes 23 countries as fine and flavour cocoa exporters - International Cocoa Organization*. <https://www.icco.org/icco-panel-recognizes-23-countries-as-fine-and-flavour-cocoa-exporters/>
- Therond, O., Sibertin-Blanc, C., Lardy, R., Gaudou, B., Balestrat, M., Hong, Y., Louail, T., Nguyen, V. B., Panzoli, D., Sanchez-Perez, J. M., Sauvage, S., Taillandier, P., Vavasseur, M., & Mazzega, P. (2014). Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems. *Proceedings - 7th International Congress on Environmental Modelling and Software: Bold Visions for Environmental Modeling, IEMSs 2014*, 4, 1833–1840.
- Topping, C. J. (2011). Evaluation of wildlife management through organic farming. *Ecological Engineering*, 37(12), 2009–2017.

- <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.010>
- Torbert, H. A., Krueger, E., & Kurtener, D. (2009). Soil quality assessment using fuzzy modeling. *International Agrophysics*, 22(4), 365–370.
- Tsai, Y., Zia, A., Koliba, C., Bucini, G., Guilbert, J., & Beckage, B. (2015). An interactive land use transition agent-based model (ILUTABM): Endogenizing human-environment interactions in the Western Missisquoi Watershed. *Land Use Policy*, 49, 161–176. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.008>
- U.S. Environmental Protection Agency. (1996). *Soil Screening Guidance: User's Guide Second Edition*. July. <https://www.nrc.gov/docs/ML0824/ML082480252.pdf>
- USDA. (1996). Indicators for Soil Quality Evaluation. *Soil Quality Information Sheet*, April, 1–2.
- Vargas, M. L. M. (1994). Sobre el concepto de percepción. *Alteridades*, 4(8), 47–53. <https://www.redalyc.org/pdf/747/74711353004.pdf>
- Vogel, H. J., Eberhardt, E., Franko, U., Lang, B., Ließ, M., Weller, U., Wiesmeier, M., & Wollschläger, U. (2019). Quantitative Evaluation of Soil Functions: Potential and State. *Frontiers in Environmental Science*, 7(October). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164>
- Wilensky, U., & Rand, W. (2015). *An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. Massachusetts Institute of Technology.
- Wilinski, A., Méndez, M., & Martínez, I. (2013). La complejidad como una opción para la construcción de saberes en la investigación doctoral. *Revista de Pedagogía*, 34–35(95–96), 89–109. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=65932613007>
- Yadav, S. K. (2010). Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*, 76(2), 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2009.10.007>
- Yager, R. R. (1988). On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision-making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 18(1), 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.02.009>
- Zhang, B., Zhang, Y., Chen, D., White, R. E., & Li, Y. (2004). A quantitative evaluation system of soil productivity for intensive agriculture in China. *Geoderma*, 123(3–4),

319–331. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.02.015>

Zheng, C., Liu, Y., Bluemling, B., Mol, A. P. J., & Chen, J. (2015). Environmental potentials of policy instruments to mitigate nutrient emissions in Chinese livestock production. *Science of the Total Environment*, 502, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.004>

Zuñiga, E. O., & Roa, P. G. L. (2018). *Física ambiental. Un llamado a la interioridad* (U. del Valle (Ed.)).

Zuñiga Escobar, Orlando; Reyes Trujillo, A. (2007). *Electro-thermal measurement device for e.g. evaluating compaction of agricultural soil has upper lid having orifice through which soil sample is introduced for evaluating soil's thermal conductivity* (Patent No. ES 2 259 498 B1). https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?FT=D&date=20070916&DB=&locale=en_EP&CC=ES&NR=2259498B1&KC=B1&ND=4#