Servicios ecosistémicos

aportados por sistemas de producción en laderas de la cuenca media del río Combeima (departamento del Tolima, Colombia):

Un aporte a la gestión del recurso hídrico

Autores:

Hernán Jair Andrade Castañeda
Milena Andrea Segura Madrigal
Erika Sierra Ramírez
Diana Skarly Canal Daza
Jader Muñoz Ramos
Jairo Ricardo Mora Delgado
Paola Rodríguez
Daniel Enrique Guauque Mellado
Luz Stella Barreto Sánchez
Antonio José Guio Duque
Luis Miguel Acuña Simbaqueva
Perla Tatiana Varón Vargas
Lucía Martínez Restrepo
Eliana Lizeth Medina Ríos
Mayra Alejandra Barragán Machado
María del Pilar Marín Quintero
Raúl Stiven Siachoque García
Juan Fernando Gutiérrez
Oscar Izquierdo

Grupos de Investigación:

Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales (PROECUT)
Sistemas Agroforestales Pecuarios (SAFP)
Cuencas Hidrográficas y Biodiversidad
Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales (GIBDET)

Servicios ecosistémicos

aportados por sistemas de producción en laderas de la cuenca media del río Combeima (departamento del Tolima, Colombia):

Un aporte a la gestión del recurso hídrico

Universidad del Tolima

Servicios ecosistémicos aportados por sistemas de producción en laderas de la cuenca media del río Combeima (departamento del Tolima, Colombia) : un aporte a la gestión del recurso hídrico / Hernán Jair Andrade Castañeda … [et al.]. -- 1ª. ed. – Universidad del Tolima, 2018. 192 p. : il., fotos

Contenido: Sección 1: Caracterización de las familias y sistemas productivos de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia) -- Sección 2: Propiedades edafológicas en los paisajes de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia) – Sección 3: Aptitud de uso de la tierra e impactos ambientales de los sistemas de producción -- Sección 4: Servicios ecosistémicos aportados por los sistemas de producción agropecuarios

ISBN: 978-958-8932-75-0 (digital)
ISBN: 978-958-8932-74-3 (papel)

1. Economía ambiental 2. Servicios ambientales 3. Cuencas hidrográficas - Conservación I. Segura Madrigal, Milena Andrea II. Sierra Ramírez, Erika III. Canal Daza, Diana Skarly IV. Muñoz Ramos, Jader V. Mora Delgado, Jairo Ricardo VI. Titulo

333.7316
S491

© Sello Editorial Universidad del Tolima, 2018
© Hernán Jair Andrade Castañeda, Milena Andrea Segura Madrigal, Erika Sierra Ramírez, Diana Skarly Canal Daza, Jader Muñoz Ramos, Jairo Ricardo Mora Delgado, Paola Rodríguez, Daniel Enrique Guauque Mellado, Luz Stella Barreto Sánchez, Antonio José Guio Duque, Luis Miguel Acuña Simbaqueva, Perla Tatiana Varón Vargas, Lucía Martínez Restrepo, Eliana Lizeth Medina Ríos, Mayra Alejandra Barragán Machado, María del Pilar Marín Quintero, Raúl, Stiven Siachoque García, Juan Fernando Gutiérrez, Oscar Izquierdo

Primera edición: 300 ejemplares
ISBN: 978-958-8932-74-3 (papel)
ISBN: 978-958-8932-75-0 (digital)
Número de páginas: 192
Ibagué-Tolima

Facultad de Ingeniería Agronómica
Facultad de Ingeniería Forestal

Grupos de investigación:
Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales (PROECUT)
Sistemas Agroforestales Pecuarios (SAFP)
Cuencas Hidrográficas y Biodiversidad
Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales (GIBDET)

Servicios ecosistémicos aportados por sistemas de producción en laderas de la cuenca media del río Combeima (departamento del Tolima, Colombia) : un aporte a la gestión del recurso hídrico
publicaciones@ut.edu.co
hjandrade@ut.edu.co

Impresión por y Panamericana Formas e Impresos S.A.
Diseño y diagramación por Andrés Ortiz - k2 Comunicación Visual
Portada: HanaHaki Opaco
Fotografías: los autores

Todos los derechos reservados. Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin permiso expreso del autor.

Presentación

La cuenca andina del río Combeima se ha utilizado tradicionalmente como la principal fuente de abastecimiento de agua para el acueducto de la ciudad de Ibagué y de algunos sistemas de riego de la región, y de servicios ecosistémicos de recreación, esparcimiento y belleza escénica para la población ibaguereña.

Este libro es producto del proyecto "Servicios ecosistémicos aportados por sistemas agroforestales en laderas de la cuenca del río Combeima (Departamento del Tolima) a la gestión del recurso hídrico", financiado por la Oficina Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima a través de la convocatoria 007-2013, con código 290113. El proyecto fue planteado y desarrollado por los grupos de investigación:

- Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales: Categoría B en Colciencias, centra su investigación para fomentar la producción amigable con el medio ambiente, principalmente el análisis de servicios ecosistémicos.
- Sistemas Agroforestales Pecuarios: Categoría A en Colciencias, desarrolla investigaciones que apuntan a entender las interacciones biofísicas en los sistemas agroforestales pecuarios, es decir, las interacciones entre árboles, pasturas y animales. Dentro de las dinámicas se evalúan aspectos como la diversidad, interacciones físico-bióticas y los aspectos sociales y culturales.
- Cuencas Hidrográficas y Biodiversidad: Categoría B en Colciencias, enfoca sus trabajos en el campo de la planificación y el manejo ambiental de cuencas hidrográficas, buscando entender y dar respuestas sobre la interacción sociedad – naturaleza.
- Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales: Categoría B en Colciencias, busca principalmente generar conocimiento técnico y científico del estado de la biodiversidad, estructura y dinámica de los ecosistemas estratégicos colombianos.

Se diferencian cuatro secciones en el libro:

- Sección I: Caracterización de las familias y sistemas productivos de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia).
- Sección II: Propiedades edafológicas en los paisajes de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia).

- Sección III: Aptitud de uso de la tierra e impactos ambientales de los sistemas de producción.
- Sección IV: Servicios ecosistémicos aportados por los sistemas de producción agropecuarios.

Los capítulos en cada sección son desarrollados de manera muy didáctica, con el fin de que el documento se convierta en fuente de información clara y sencilla para productores y técnicos que desarrollan labores en la cuenca.

Contenido

Sección I
Caracterización de las familias y sistemas productivos
de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia) 23

1. Caracterización biofísica y socioeconómica de fincas
en la microcuenca de la quebrada La Plata (Ibagué, Colombia) 25

Resumen 25

Abstract 26

1.1. Introducción 26

1.2. Materiales y métodos 27

1.2.1. El muestreo 28

1.2.2. Análisis de datos 29

1.3. Resultados y discusión 30

1.3.1. Capital humano 32

1.3.2. El capital social 33

1.3.3. Usos del suelo 34

1.3.4. Capital económico: portafolio de actividades
y el ingreso monetario 35

1.4. Conclusiones 37

1.5. Agradecimientos 38

1.6. Referencias 38

2. Balance energético de cuatro modelos de sistemas de
producción agrícola en las cuencas media y alta del río Combeima 41

Resumen 41

Abstract 42

2.1. Introducción 42

2.2. Materiales y métodos 45
2.2.1. Área de estudio 45
2.2.2. Muestreo 46
2.2.3. Recolección de la información 47
2.2.4. Análisis estadístico 47
2.2.5. Análisis energético 47
2.2.6. Modelación de los sistemas de producción 49
2.3. Resultados y discusión 49
2.3.1. Descripción de los conglomerados o grupos 49
2.3.2. Características de los modelos hipotéticos de sistemas de producción (MHSP) 50
2.3.3. Modelación de los sistemas de producción 52
2.3.4. Balances energéticos de los sistemas de producción 56
2.4. Conclusiones 59
2.5. Agradecimientos 59
2.6. Referencias 59

Sección II
Propiedades edafológicas en los paisajes de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia) 63

3. Propiedades físicas e hidrológicas en áreas con los usos del suelo dominantes en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia) 65
Resumen 65
Abstract 66
3.1. Introducción 66
3.2. Materiales y métodos 68
3.2.1. Área de estudio 68
3.2.2. Usos del suelo 69
3.2.3. Muestreo de suelos 70
3.2.4. Análisis estadístico 72
3.3. Resultados y discusión 72
3.3.1. Características físicas 72
3.3.2. Características hidrológicas 74

3.4. Conclusiones 75
3.5. Agradecimientos 75
3.6. Referencias 76
4. Impacto de los usos del suelo en las propiedades químicas de los suelos en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia) 79
Resumen 79
Abstract 80
4.1. Introducción 80
4.2. Materiales y métodos 82
4.2.1. Área de estudio 82
4.2.2. Usos del suelo 83
4.2.3. Muestreo de suelos 83
4.2.4. Análisis estadístico 84
4.3. Resultados y discusión 84
4.4. Conclusiones 90
4.5. Agradecimientos 90
4.6. Referencias 91

Sección III
Aptitud de uso de la tierra e impactos ambientales de los sistemas de producción 97

5. Impacto ambiental de los sistemas de uso del suelo en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) 99
Resumen 99
Abstract 100
5.1. Introducción 100
5.2. Materiales y métodos 101
5.2.1. Área de estudio 101
5.2.2. Estudio de la oferta ambiental del territorio 102
5.2.3. Estudio de la demanda ambiental de los sistemas de uso del suelo 102
5.2.4. Evaluación del impacto ambiental 103
5.2.5. Plan de manejo ambiental 106

5.3. Resultados y discusión 106
5.3.1. Oferta ambiental del territorio 106
5.3.2. Demanda ambiental de los sistemas de uso del suelo 107
5.3.3. Evaluación del impacto ambiental 109
5.3.4. Plan de manejo ambiental 119
5.4. Conclusiones 121
5.5. Agradecimientos 122
5.6. Referencias 122

Sección IV
Servicios ecosistémicos aportados por los sistemas
de producción agropecuarios 127

6. Potencial de adaptación al cambio climático de sistemas
de uso del suelo en la cuenca media de río Combeima
(Ibagué, Colombia) 129
Resumen 129
Abstract 130
6.1. Introducción 130
6.2 Materiales y métodos 132
6.2.1. Área de estudio 132
6.2.2. Diseño de muestreo 133
6.2.3. Diversidad florística 134
6.2.4. *Stock* de biomasa y necromasa 134
6.2.5. Análisis estadístico 135
6.3. Resultados y discusión 136
6.3.1. Composición florística 136
6.3.2. *Stock* de biomasa arbórea y hojarasca 138
6.3.3. Adaptación al cambio climático 140
6.4. Conclusiones 142
6.5. Agradecimientos 142
6.6. Referencias 142

7. Carbono orgánico del suelo en los usos del suelo predominantes en la microcuenca de La Plata (Ibagué, Tolima, Colombia) 149
Resumen 149
Abstract 150
7.1. Introducción 150
7.2. Materiales y métodos 151
7.2.1. Área de estudio 151
7.2.2. Diseño de muestreo 152
7.2.3. Impacto de potenciales cambios de uso del suelo en las existencias de COS 154
7.2.4. Análisis estadístico 154
7.3. Resultados y discusión 155
7.3.1. Densidad aparente 155
7.3.2. Concentración de carbono orgánico del suelo (COS) 156
7.3.3. Almacenamiento del COS 157
7.3.4. Implicaciones del cambio de uso del suelo sobre el COS 159
7.4. Conclusiones 160
7.5. Agradecimientos 161
7.6. Referencias 161

8. Huella hídrica de los sistemas de producción agrícola predominantes en zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) 165
Resumen 165
Abstract 166
8.1. Introducción 166
8.2. Materiales y métodos 167
8.2.1. Fase 1. Definición del alcance 167
8.2.2. Fase 2: Cuantificación de las huellas hídricas (HH) 168
8.2.3. Fase 3: Análisis de sostenibilidad 171
8.2.4. Fase 4: Estrategias de respuesta 174
8.3. Resultados y discusión 174
8.3.1. Caracterización de los sistemas de producción 174

8.3.2. Cuantificación de la huella hídrica de los sistemas de producción 177
8.3.3. Análisis de sostenibilidad 181
8.3.4. Estrategia de respuesta 184
8.4. Conclusiones 186
8.5. Referencias 186

Lista de figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio, microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). 28

Figura 2. Aplicación de encuestas en predios de la microcuenca La Plata, río Combeima (Ibagué, Tolima). 29

Figura 3. Representación de observaciones multivariadas en tres grupos, definidas por análisis de conglomerados en el espacio discriminante conformado por los ejes canónicos 1 y 2 del análisis discriminante canónico para 54 fincas en la microcuenca de la quebrada La Plata (Ibagué, Colombia). 31

Figura 4. Usos del suelo en los conglomerados analizados de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). 34

Figura 5. Portafolio de actividades en las fincas analizadas de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). Las barras de error corresponden al error estándar. 35

Figura 6. Ingreso anual bruto de los hogares analizados de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). Las barras corresponden al error estándar. 36

Figura 7. Indicador habitacional (número de habitaciones por habitante) en las residencias de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). Las barras corresponden al error estándar. 37

Figura 8. Localización de la cuenca del río Combeima donde se realizó el estudio. 45

Figura 9. Dendograma del análisis de conglomerados, según la técnica de Ward, para 54 fincas del corregimiento 8, microcuenca de la quebrada La Plata, zona rural del municipio de Ibagué, Colombia (2014). G1: Grupo 1; G2: Grupo 2; G3: Grupo 3; G4: Grupo 4. 50

Figura 10. Diagrama causal (Vensim) de un sistema café a libre exposición analizado de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). 52

Figura 11. Diagrama causal (Vensim) de un sistema café-sombrío analizado de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). 54

Figura 12. Diagrama causal (Vensim) de un sistema mora analizado de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). 55

Figura 13. Diagrama causal (Vensim) de un sistema de pasturas analizado de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). 56

Figura 14. Mapa de localización de la microcuenca de la quebrada La Plata (Ibagué, Colombia). 69

Figura 15. Panorámica del paisaje agropecuario y forestal de la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). 70

Figura 16. Muestreo de suelos para determinación de DA y DR en sistemas de uso del suelo dominantes en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). 71

Figura 17. Elementos utilizados para los ensayos *in situ* de infiltración (a) y conductividad hidráulica (b) en suelos bajo sistemas de uso predominante en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). a: doble anillo concéntrico para prueba de infiltración; b: tubo de PVC usado para prueba de conductividad hidráulica. 71

Figura 18. Conductividad hidráulica e infiltración en suelos de ladera en los principales sistemas de uso del suelo en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). Las barras de error corresponden a error estándar. Medias con una letra común indican que no son estadísticamente diferentes según la prueba de Tukey ($p > 0,05$). 74

Figura 19. Ubicación de la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). 82

Figura 20. Principales características químicas de suelos bajo los usos del suelo dominantes en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). Los valores corresponden a media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticas entre sistemas de uso del suelo ($p < 0,05$). 86

Figura 21. Localización general de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia). 102

Figura 22. Ubicación geográfica de la microcuenca La Plata (Tolima, Colombia). 132

Figura 23. Sistemas de uso de suelo evaluados: cultivo de granadilla (izquierda) y cultivo de café (derecha) en la microcuenca La Plata (Tolima, Colombia). 133

Figura 24. Bosque en la microcuenca La Plata (Ibagué, Tolima, Colombia). 134

Figura 25. Método para la estimación de materia seca en hojarasca en sistemas de uso del suelo en la microcuenca de La Plata (Ibagué, Tolima, Colombia). 135

Figura 26. Índice de valor de importancia de la vegetación arbórea presente en bosques y en sistemas agroforestales con café (SAF-café) en la microcuenca La Plata (Ibagué, Tolima, Colombia). Albcar: *Albizia carbonaria*; Cecang: *Cecropia angustifolia*; Cedodo: *Cedrela odorata*; Chioff: *Chinchona officinalis*; Citsp: *Citrus* sp; Corall: *Cordia alliodora*; Cupsem: *Cupressus sempervirens*; Eryrub: *Erythrina rubrinervia*; Eucgra: *Eucalyptus grandis*; Ficela: *Ficus elastica*; Ficmat: *Ficus mathewsii*; Fracha: *Fraxinus chinensis*; Guaang: *Guadua angustifolia*; Ingedu: *Inga edulis*; Perame: *Persea americana*; Psigua: *Psidium guajava*; Solmac: *Solanum macranthum*; Tricol: *Trichospermum colombianum*; Urecar: *Urera caracasana*. 138

Figura 27. Biomasa arriba y abajo del suelo en los usos del suelo dominantes en la microcuenca de la Plata (Ibagué, Colombia). Los valores indican las medias ± error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre sistemas de uso del suelo. 139

Figura 28. Materia seca en hojarasca en los usos del suelo dominantes en la microcuenca de La Plata (Ibagué, Colombia). SAF: sistemas agroforestales. Los valores indican las medias ± error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre sistemas de uso del suelo. 140

Figura 29. Indicador local de la capacidad de adaptación de los sistemas de uso del suelo en la cuenca media del río Combeima (Ibagué). El límite del círculo es definido como el máximo valor posible en cada variable. SAF: sistemas agroforestales. 141

Figura 30. Estructura del paisaje predominante de las fincas en la microcuenca de La Plata (Ibagué, Colombia). 152

Figura 31. Pasos metodológicos en la toma de muestras en campo para estimar la densidad aparente por el método del cilindro. 153

Figura 32. Barreno empleado en la toma de muestras de suelo para estimar la concentración del carbono orgánico del suelo (COS). 154

Figura 33. Densidad aparente y concentración de carbono orgánico del suelo (COS) en sistemas de uso del suelo predominantes en la parte media de la quebrada La Plata (Ibagué, Tolima, Colombia). Las barras de error corresponden a error estándar. Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticas ($p > 0,05$) entre sistemas de uso del suelo. 155

Figura 34. Relación entre la concentración de carbono orgánico del suelo (COS) y la densidad aparente (DA) a una profundidad de 0-30 cm en los sistemas de uso del suelo predominantes en la microcuenca de la quebrada La Plata (Ibagué, Colombia). SAF-C: sistemas agroforestales con café; MC: monocultivos de café; CP: cultivos perennes (granadilla - mora): P: pastos de corte; F: fríjol; B: bosques nativos. Las barras de error corresponden a error estándar. 157

Figura 35. Almacenamiento de carbono orgánico del suelo a una profundidad de 0-30 cm en sistemas de uso del suelo predominantes en la parte media de la quebrada La Plata, (Ibagué, Tolima, Colombia). SAF-C: sistemas agroforestales con café; MC: monocultivos de café; CP: cultivos perennes (granadilla - mora); P: pastos de corte; F: fríjol; B: bosques nativos. Las barras de error corresponden a error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$). 158

Figura 36. Sistemas de producción agrícolas predominantes en la zona de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). 175

Figura 37. a) Huella hídrica verde (HHV) de los sistemas de producción predominantes en zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). b) Porcentaje de la HHV de cada uno de los sistemas de producción predominantes. 178

Figura 38. Huella hídrica gris (*HHG*) de los sistemas de producción predominantes en zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). a): Consumo de agua (m^3) para diluir las cargas contaminantes por tonelada de producción de los sistemas priorizados. b): relación porcentual de la HHG en los sistemas de producción predominantes. 179

Lista de tablas

Tabla 1
Características de la finca y el núcleo familiar por conglomerado de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia) 32

Tabla 2
Contenido energético de los factores que intervienen como *inputs* en los sistemas de producción 48

Tabla 3
Descripción de cuatro grupos de fincas con sus sistemas de producción del corregimiento 8, microcuenca de la quebrada La Plata, zona rural del municipio de Ibagué 50

Tabla 4
Inputs energéticos en cuatro sistemas de producción pertenecientes a la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia) 57

Tabla 5
Características físicas de los suelos en los sistemas de uso del suelo predominantes en la microcuenca La Plata, municipio de Ibagué (Colombia), 2017 73

Tabla 6
Métodos analíticos utilizados para la determinación de las variables químicas de los suelos bajo sistemas de uso predominante en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). 83

Tabla 7
Contenido de macronutrientes de los suelos a una profundidad de 0 a 30 cm, en sistemas de uso del suelo predominantes en la microcuenca La Plata, municipio de Ibagué (Colombia), 2017 89

Tabla 8
Contenido de micronutrientes de los suelos a una profundidad de 0 a 30 cm, en sistemas de uso del suelo predominantes en la microcuenca La Plata, municipio de Ibagué (Colombia), 2017. 89

Tabla 9
Escala calificativa del nivel de importancia de los impactos ambientales (positivos- negativos). 104

Tabla 10
Escala calificativa del impacto global e impacto global neto. 105

Tabla 11
Matriz chequeo de efectos ambientales generados en las etapas de los sistemas de uso del suelo (LUS) en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) 109

Tabla 12
Matriz de evaluación de las importancias unitaria (IU) y relativa (IR) de los impactos ambientales generados en las etapas de los sistemas de uso del suelo (LUS), en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) 111

Tabla 13
Jerarquización y balance de los impactos ambientales generados en los sistemas de uso del suelo (LUS), en la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) 114

Tabla 14
Matriz de evaluación del impacto global (IG) de los impactos ambientales generados en el escenario inicial, "sin proyecto", en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) 117

Tabla 15
Matriz de evaluación del impacto global (IG) de los impactos ambientales generados por los sistemas de uso del suelo, escenario "con proyecto", en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) 118

Tabla 16
Síntesis de medidas contempladas en el plan de manejo ambiental (PMA) para las actividades propias de los sistemas de uso del suelo en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) 120

Tabla 17
Ecuaciones alométricas empleadas para estimar la biomasa arriba por individuo y abajo del suelo de acuerdo a especie o grupo de especies o zona de vida 136

Tabla 18
Abundancia, área basal y riqueza de especies arbóreas en bosques y sistemas agroforestales con café en la microcuenca de La Plata, en la cuenca media del río Combeima (Ibagué, Colombia) 137

Tabla 19
Posibles cambios en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (t CO_2e/ha) por cambios potenciales de sistemas de uso del suelo en la microcuenca de La Plata (Ibagué, Colombia) 159

Tabla 20
Valores de los parámetros solicitados por el programa Cropwat 8.0 (FAO, 2010) para obtener los valores de huella hídrica verde (HHV) y huella hídrica azul (HHA) 169

Tabla 21
Valores de referencia del índice de escasez de agua verde (Everde, ciclo) 172

Tabla 22
Valores de referencia del nivel de contaminación del agua (NCA) 173

Tabla 23
Cantidad de fincas donde se registraron las diferentes clases de sistema de producción 175

Tabla 24
Extensión de cada sistema de producción en el área de estudio 175

Tabla 25
Índices de escasez de agua verde (Everde) y del nivel de contaminación del agua (NCA) para los sistemas de producción agrícola predominantes en las zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) 181

Tabla 26
Productividad aparente del agua (AWP) y productividad aparente de la tierra (APL) por sistemas de producción agrícola predominantes en las zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia) 183

Tabla 27
Objetivos específicos planteados para reducir la huella hídrica verde (HHV) de los sistemas de producción agrícola predominantes en zona de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia) 185

Sección I

Caracterización de las familias y sistemas productivos de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia)

1

Caracterización biofísica y socioeconómica de fincas en la microcuenca de la quebrada La Plata (Ibagué, Colombia)

Jairo Mora-Delgado[1,2*]; Lucía Martínez Restrepo[1,3]; Paola Rodríguez[1,4]

Resumen

La caracterización de sistemas de fincas y hogares en la microcuenca de la quebrada La Plata del municipio de Ibagué (Colombia), fue el objetivo de este estudio. Se aplicaron 54 encuestas en tres localidades de la microcuenca La Plata, las cuales abarcaron aspectos humanos, sociales, físicos, financieros y naturales. La tipificación evidenció cuatro grupos de fincas: el grupo 1 poseía una importante proporción del suelo bajo cultivos permanentes (83,3%), principalmente café con sombra en sistemas típicos de economía campesina, donde los cultivos transitorios constituyen la despensa de la familia; los grupos 2 y 3 estuvieron conformados básicamente por fincas dedicadas al cultivo del café y de mora, pero los cultivos transitorios también eran importantes; en el grupo 4 predominaron las pasturas (28,3%) y una gran área de conservación (50,3%), con fincas de características poco comunes, en particular por su mayor extensión (14,3 ha). En el área de estudio predominaron la diversidad productiva, tanto agrícola como pecuaria, y la heterogeneidad social típica de las sociedades campesinas.

Palabras clave: café, campesinos, ganadería, tejido social.

1 Grupo de Investigación "Sistemas Agroforestales Pecuarios" (SAFP), Universidad del Tolima.
2 Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad del Tolima.
3 Estudiante de Maestría en Desarrollo Rural, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad del Tolima.
4 Estudiante de Doctorado, Manejo de Cuencas, Universidad del Tolima.
* Autor para correspondencia, correo electrónico: jrmora@ut.edu.co

Abstract

The characterization of farm and household systems in the micro-watershed of the *La Quebrada La Plata* in the municipality of Ibagué, Colombia, was the objective of this study. A total of 54 surveys were carried out in three localities of the La Plata basin, which covered human, social, physical, financial and natural aspects. The typification showed four groups of farms: group 1 had a significant proportion of the land under permanent crops (83.3%), mainly shade coffee under typical peasant economy systems, where transitional crops constitute the family pantry; groups 2 and 3 were basically made up of farms dedicated to coffee cultivation and blackberry cultivation, but transitional crops are important; in group 4 pastures (28.3%) and a large conservation area (50.3%) were predominantly farms with unusual characteristics, particularly due to their greater area (14.3 ha). The productive diversity, both agricultural and livestock, and the social heterogeneity typical of peasant societies prevailed on the study area.

Keywords: coffee, peasants, livestock, social networks.

1.1. Introducción

La caracterización productiva y socioeconómica de un territorio constituye una herramienta importante para la toma de decisiones y propuestas de política pública. Generalmente, se puede recurrir a estudios previos o a la recopilación de información primaria para describir y tipificar los hogares, las fincas de un territorio y los sistemas de producción. Tal información es fundamental en proyectos de valoración de los servicios ecosistémicos en una cuenca. Existe un importante número de estudios sobre el cañón del Combeima, en cuyo territorio se tiene una gran diversidad productiva y ambiental dada por la diversidad de los sistemas de producción, la oferta ambiental y la organización social (Lozada *et al.,* 2017; Mora-Delgado *et al.,* 2017). Así, la complejidad de ellos es abordada como un objeto de análisis, lo que constituiría una base para el diseño de políticas diferenciadas (Berdegué & Larraín, 1988). En este sentido, realizar una caracterización de los hogares y fincas de la cuenca media del Combeima, así como establecer una tipología, brinda las herramientas para tal fin y constituye un trabajo de análisis importante.

El término 'tipología' puede usarse para designar el ejercicio de clasificación y de esta forma ayudar a analizar una realidad compleja y el orden de

los objetos que, a pesar de ser diferentes, son de un mismo tipo, como una finca (Landais, 1998). Por otra parte, puede usarse el concepto de tipología para designar el sistema de tipos resultante de este proceso. La tipificación busca agrupar a hogares con características de manejo, producción y técnicas similares (Escobar & Berdegué, 1990) o también sistemas productivos que se caracterizan porque no están formados por explotaciones homogéneas, existiendo una gran diversidad de estas, con diferentes caracteres físicos, socioeconómicos o técnicos, lo que dificulta la toma de decisiones de carácter transversal (Coronel & Ortuño, 2005).

En tal sentido, al agrupar las explotaciones de acuerdo a sus principales diferencias y relaciones se busca maximizar la homogeneidad dentro de los grupos y la heterogeneidad entre estos (Cabrera *et al.,* 2004). Este tipo de caracterización de situaciones productivas, más la planificación racional de la investigación y la extensión, determina grandes zonas agroecológicas y define áreas homogéneas de producción, tipifica los productores y describe los sistemas productivos con el objetivo de conocer en detalle la realidad productiva local, microrregional y departamental, e identificar los patrones productivos y los factores limitantes (García & Calle, 1998).

La cuenca del río Combeima se ha utilizado tradicionalmente como la principal fuente que abastece de agua al acueducto de Ibagué y a sistemas de riego y servicios ecosistémicos de la población. Al ser evidente que en el sector rural de la cuenca se ha asentado un alto número de núcleos familiares, pequeños productores que establecieron una variedad de sistemas productivos sin considerar las limitantes ambientales (Mora-Delgado *et al*., 2017), el objetivo de este capítulo es caracterizar, desde el punto de vista productivo y socioeconómico, los sistemas de finca y sus hogares en la cuenca media del río Combeima.

1.2. Materiales y métodos

El estudio se realizó en la microcuenca La Plata, localizada en la cuencas alta y media del río Combeima, ubicadas entre 04º 19’ 30” - 04º 39’ 57” N y 75º 10’ 11” - 75º 23’ 23” O, sobre el flanco oriental de la cordillera Central de los Andes en Colombia. Este territorio cuenta con una amplia zona rural, diversa tanto en arreglos productivos como en condiciones topográficas, que van desde laderas con pendientes superiores al 80% en la parte alta de la cuenca, hasta tierras planas en las vegas de los ríos. Sus franjas altitudinales varían entre 800 y 5215 m; sin embargo, hasta los 2600 m se registra la actividad agropecuaria de mayor importancia (Figura 1).

Figura 1. Localización de la zona de estudio, microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia).

Inicialmente se consultaron fuentes secundarias y se hizo un acercamiento previo a la comunidad con los líderes locales. Luego, la búsqueda en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y de material cartográfico permitió obtener una aproximación al número total de predios rurales y la distribución de los usos agropecuarios del suelo en la zona, y un análisis de la distribución predial en la cuenca del río Combeima permitió tener una idea sobre las características de la estructura agraria en la zona de estudio, estimándose así un total de 1589 predios debidamente legalizados ante el IGAC, de los cuales 98% tienen extensión menor o igual a 100 ha (Mora-Delgado *et al.,* 2017).

1.2.1. El muestreo

La toma de datos siguió el procedimiento *snowball*, o muestreo 'bola de nieve', consistente en seleccionar un grupo inicial de encuestados al azar. A este grupo, después de ser entrevistado, se le pidió que identificara otros similares en la población de interés; así, los siguientes encuestados se seleccionaron con base en las referencias dadas por los primeros. De esta manera, dicho sistema de muestreo incrementa sustancialmente la probabilidad de localizar la característica deseada en la población y la variación de la muestra (Coleman, 1958; Malhotra *et al.,* 2004). En este estudio se logró una muestra 54 fincas aleatoriamente seleccionadas en diferentes áreas de la microcuenca (Figura 2).

Figura 2. Aplicación de encuestas en predios de la microcuenca La Plata, río Combeima (Ibagué, Tolima).

La información se recopiló mediante una visita a cada finca y se realizó una encuesta estructurada con preguntas puntuales —siguiendo lo sugerido por Cadoche (1998)— para lograr mayor riqueza en las respuestas. Las encuestas, aplicadas al propietario o al encargado de la finca, fueron conformadas en módulos organizados por temas: 1) generalidades de la finca; 2) capital social; 3) capital natural; 4) componente agropecuario; 5) cultivos; 6) capital físico, y 7) capital financiero.

1.2.2. Análisis de datos

Con los resultados de las encuestas se creó una base de datos en Microsoft Excel mediante la cual se realizó una estadística descriptiva y así poder identificar las variables claves para realizar un análisis de componentes principales (ACP) y un análisis de conglomerados (AC). El primero explica el peso de cada una de las variables en la variación del total de la muestra y permite crear nuevas categorías de análisis (variables artificiales); el AC, por su parte, ordena objetos en grupos —conglomerados— de forma que el grado de asociación/similitud entre miembros del mismo clúster sea más fuerte que el grado de asociación/similitud entre miembros de diferentes clúster (Villardón, 2007). Así, este agrupamiento apunta a lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos. Para ello se usó el método de Ward, que es jerárquico aglomerativo, maximiza las medidas de similaridad y minimiza las

distancias para formar grupos (De la Fuente, 2011). De cada conglomerado se estimaron indicadores sociales, como los índices educativo y de participación, siguiendo la metodología usada por Rocha *et al.* (2016), mediante las siguientes ecuaciones:

Índice educativo (IE)

$$IE = F(1)\sum_{i=1}^{K} nXi\ (grados)$$

donde:

IE : Índice educativo.
n : Número de integrantes de la familia.
Xi : *i*-ésima característica para el grado con i: 1, 2, 3… K características.
F(1) : Factor de corrección. Preescolar: 0,2; Primaria: 0,3; Secundaria: 0,5; Técnico: 0,7; Universitario: 1,0; Posgrado: 1,2.

Índice de participación

$$Par = \sum_{n=i}^{K} (Xi)$$

donde:

Par : Índice de participación.
Xi : Valor absoluto de la *i*-ésima variable: número de formas de organización a las que pertenece.
n : Número de acciones colectivas realizadas y participación o no en actividades de capacitación.

1.3. Resultados y discusión

En el ACP los autovalores o *eigenvalues* mostraron que los primeros cuatro componentes explicaron el 69% acumulado de la variación del total de la muestra y es notorio un decrecimiento a partir del cuarto valor. Esto permite la reducción de las variables de las once originales a las cuatro categorías siguientes: primer componente (usos del suelo): área total de la finca, cultivos permanentes y área de conservación; segundo componente (capital humano): integrantes de la familia e índice educativo; tercer componente (capital económico): habitaciones de la casa, ingresos anuales y portafolio de actividades, y el cuarto componente (capital social), está representado por el número de vínculos sociales.

El agrupamiento obtenido en el AC definió cuatro grupos en las 54 fincas (C1: 8; C2: 15; C3: 19 y C4: 12), con relación a los cuales, a partir de los autovalores, se puede concluir que el eje canónico 1 explica el 59% de la variación entre grupos y el 27% es explicado por el eje 2. En el análisis discriminante canónico (AD) de las dos funciones discriminantes generadas (o sea dos ejes canónicos), la primera función confirma los cuatro grupos de fincas con características diferenciadoras entre sí: tres de ellos agrupan predios de tamaño mediano, mientras que el cuarto —a la derecha del eje 1— lo conforman predios de mayor tamaño y baja presencia de cultivos permanentes como el café, los cuales se separan del resto de fincas (Figura 3). Es decir, las fincas con cultivos permanentes se localizan a la izquierda y las que tiene mayor tendencia ganadera por la presencia de pasturas se ubican a la derecha. La tabla de clasificación cruzada señala que el 100% de las fincas de cada uno de los grupos fueron bien clasificadas, representando una tasa de error de clasificación en cada conglomerado del 0%.

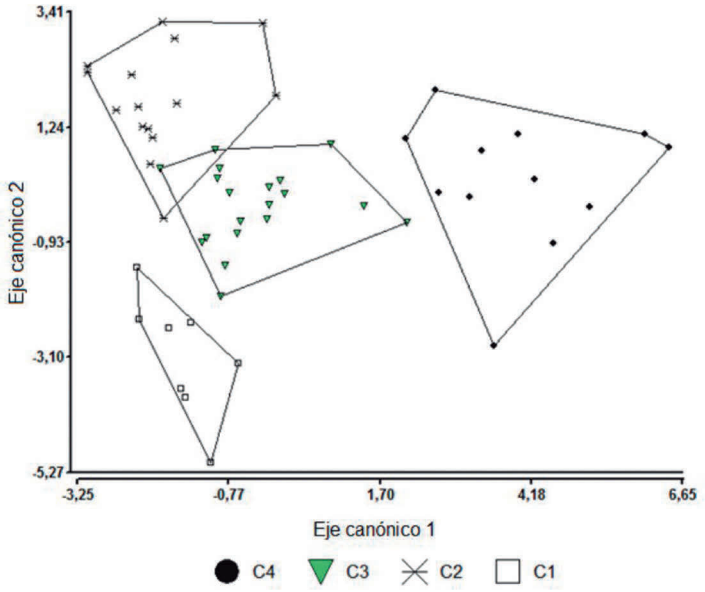

Figura 3. Representación de observaciones multivariadas en tres grupos, definidas por análisis de conglomerados en el espacio discriminante conformado por los ejes canónicos 1 y 2 del análisis discriminante canónico para 54 fincas en la microcuenca de la quebrada La Plata (Ibagué, Colombia).

1.3.1. Capital humano

El capital humano está representado por los indicadores del núcleo familiar y de los individuos que lo conforman, para determinarlo se organizó la información generada con las encuestas (Tabla 1). Las familias estudiadas son nucleares biparentales, es decir, por lo general comparte techo una familia de sangre con dos progenitores —madre y padre— y uno o varios hijos, aunque hay excepciones al haber solo un jefe de familia por ausencia de la pareja, causada por muerte o separación. En su mayoría son familias estables desde hace años y el promedio de edad de la cabeza de hogar sugiere que están establecidos en el territorio. El promedio de experiencia como agricultores, aunque denota amplia dispersión, demuestra el ser familias que poseen un conocimiento consolidado de la vida rural.

Tabla 1
Características de la finca y el núcleo familiar por conglomerado de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia)

Variable	C1	C2	C3	C4
Área predial (ha)	2,3 b	2,5 b	2,5 b	14,3 a
Miembros de la familia (N.°)	3,6 ab	4,9 a	2,9 b	3,8 ab
Edad del jefe de hogar (años)	51 a	44 a	40 a	41 a
Experiencia del productor (años)	34 a	32 a	27 a	27 a
Mujeres (%)	44 a	38 a	38 a	44 a
Hombres (%)	57 a	62 a	62 a	56 a
Índice educativo (IE)	1,2 b	1,9 a	0,9 b	1,4 ab

Nota: Letras diferentes muestran medias con diferencias significativas ($p < 0,05$) entre grupos de fincas.

La muestra analizada indica que el C3 presenta hogares conformados por un número reducido de integrantes del grupo familiar. En general, este número es cercano al promedio encontrado por Mora-Delgado *et al.* (2011) en fincas cafeteras del norte del Tolima y al reportado por León (2006) en fincas de la zona cafetera de Caldas (alrededor de cuatro miembros/familia). Estos promedios, a su vez, son un poco superiores a los hallazgos de Carvajal y Méndez (2014) en el cañón de Anaime, donde el número de integrantes del grupo familiar en la muestra analizada osciló entre uno y tres. En general, el reducido total de personas en la familia se traduce en la necesidad de contratar obra de mano externa para llevar a cabo las actividades de producción en las fincas (Mora-Delgado *et al.,* 2011).

Los tres grupos mostraron una distribución de géneros similar, sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre conglomerados, en que la proporción de hombres en los hogares era ligeramente superior a las mujeres. Esto es similar a la tendencia reportada por Carvajal y Méndez (2014) para el cañón de Anaime, donde la predominancia de los hombres en la distribución de género de los hogares está por el orden de 56% y 67%. De igual forma, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en el censo de 2005 reporta que en la población rural en Colombia existía solo un 47% de mujeres (Comisión Colombiana de Juristas [CCJ], 2011).

El IE de toda la muestra fue bajo, considerándose este índice como una expresión de grados de educación avanzada por el núcleo familiar. Este índice fue más bajo en los tres conglomerados que lo reportado para la zona rural de Ibagué en el estudio de Rocha *et al.* (2016), en el cual se informa que el 75% de la muestra analizada tuvo un IE menor a 2,1.

1.3.2. El capital social

Estas familias mantienen escasos vínculos con organizaciones privadas y públicas o relaciones de confianza entre ellos, constituyen formas de capital social que configuran redes de cooperación como las descritas por Mora-Delgado (2013) en el norte del Tolima. Según el análisis de esta variable, se observa que no existen diferencias significativas ($p = 0,06$) entre conglomerados en cuanto a los vínculos sociales que mantiene cada grupo. En promedio, se encuentra un vínculo con dos organizaciones en los conglomerados C1, C3 y C4, y tres en el C2. Esto sugiere que en ese territorio los vínculos sociales son débiles y que a su vez la presencia de instituciones privadas y públicas en la zona es precaria.

En las comunidades con predominio de sociedades campesinas la importancia de pertenecer a redes es una estrategia que se ha extendido significativamente, quizá porque los vínculos con cooperativas, asociaciones, acciones colectivas, grupos comunitarios, grupos religiosos y organizaciones de productores constituyen formas de interacción social que pueden mejorar la calidad de vida de los hogares (Mora-Delgado, 2013). A pesar de esto, puede sugerirse que la participación en las diversas formas de capital social en la zona de estudio es débil. Es posible que esto sea resultado de desconocer los pobladores las formas de participación, la precariedad de las acciones colectivas y la creciente desconfianza de la ciudadanía en la política y los políticos. Por lo general lo público se asocia con la 'política' y esto conduce a su estigmatización, ya que tradicionalmente las acciones comunitarias se desenvuelven en un marco de relaciones sociales, políticas y simbólicas, bastante atravesadas por el *ethos* clientelista, al cual se suman las conductas corruptas (Velázquez & Gonzáles, 2003).

1.3.3. Usos del suelo

Al comparar el tamaño de las fincas pertenecientes a cada conglomerado se evidencia que en el C4 se agrupan las fincas más grandes, con diferencias significativas respecto de los otros conglomerados, que en la zona de estudio fueron fincas pequeñas (Figura 4). La predominancia de pequeñas propiedades coincide con la tendencia identificada en la zona rural de Ibagué entre los 1200 y 1800 m de altitud, donde el tamaño de los predios es bastante reducido (3,2 ± 2,3 ha), tal como lo sugiere el estudio de Rocha *et al.* (2016).

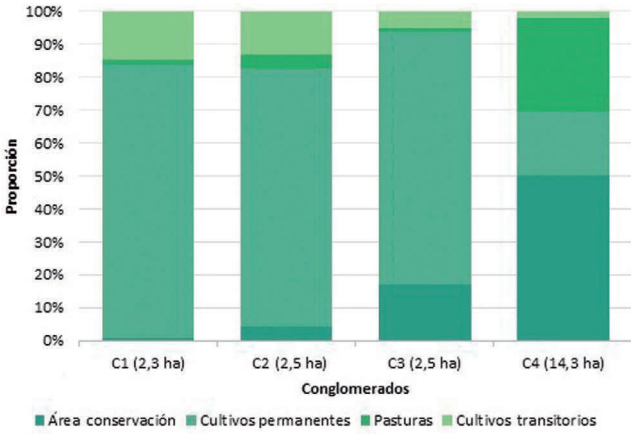

Figura 4. Usos del suelo en los conglomerados analizados de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia).

Las fincas del grupo C1 poseen una importante proporción del suelo con cultivos permanentes, a pesar de ser los predios más pequeños. Son fincas típicas de economía campesina, en las cuales se combinan actividades agrícolas y pecuarias, aunque el área en pasturas es bastante reducida; el 62% de ellas cuenta con sistemas de café y en el 50% se reporta el manejo de árboles como sombra. Los cultivos transitorios son importantes, pero por su amplia dispersión en el grupo no constituye una diferencia significativa ($p > 0,05$) respecto de los otros conglomerados. El grupo C2 está conformado básicamente por predios dedicados al cultivo del café; son fincas pequeñas con sistemas diversificados en cultivos transitorios; el 60% de ellas tienen cultivo de mora y en el mismo porcentaje hay árboles. En el C3, como en los anteriores conglomerados, se hallan fincas pequeñas, de las que solo un 47% tienen café. En este grupo se presentó la mayor proporción de cultivos de mora —70% de los predios— y en el 63% de las fincas se manejan los árboles. Por su parte, en las fincas del grupo C4 el área predial constituye un criterio de diferenciación, ya que referencia las fincas más grandes

de la muestra analizada; en las que predomina la conservación, seguido de las pasturas, y básicamente se dedican a la ganadería. Son fincas con características poco comunes, ya que además de la ganadería cultivan una pequeña área de café asociado con plátano y cultivos transitorios. En el 60% de las fincas de este grupo se reporta el manejo de árboles.

Dicha descripción del paisaje agrícola es una muestra de las tendencias encontradas en la zona de ladera del área rural de Ibagué, tal como se puede evidenciar en el trabajo de Rocha *et al.* (2016). En este estudio se infiere que las fincas son predios típicos de economía campesina, en los que se combinan actividades agrícolas y pecuarias, donde los cultivos de musáceas y otros productos como frutales, yuca y cacao, se entreveran con áreas dedicadas al café y a pasturas, y como es característico de las fincas cafeteras campesinas su superficie es pequeña.

1.3.4. Capital económico: portafolio de actividades y el ingreso monetario

La sumatoria de actividades agrícolas y pecuarias que generan ingreso en las fincas sugiere el portafolio del cual dependen las familias. Así, en la zona de estudio las familias dependen de una hasta máximo seis actividades, sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre conglomerados (Figura 5). Sin embargo, es notoria la diferencia en el ingreso monetario anual estimado y los hogares del C1 son los que presentan un ingreso significativamente ($p < 0,05$) superior al de los otros conglomerados; de hecho, corresponde a las fincas tipificadas con mayor proporción de área en café, lo cual podría explicar el mejor ingreso derivado de esta actividad (Figura 6).

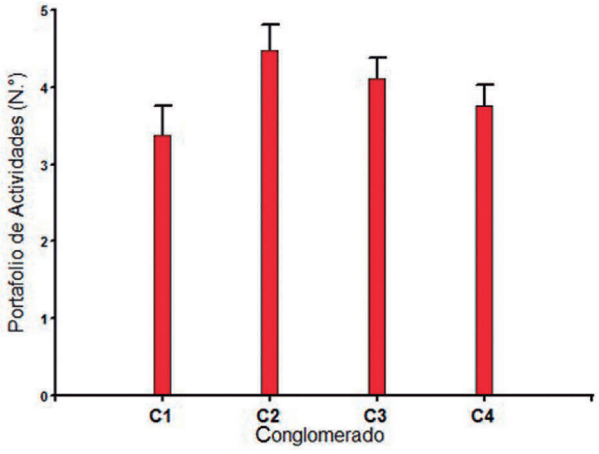

Figura 5. Portafolio de actividades en las fincas analizadas de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). Las barras de error corresponden al error estándar.

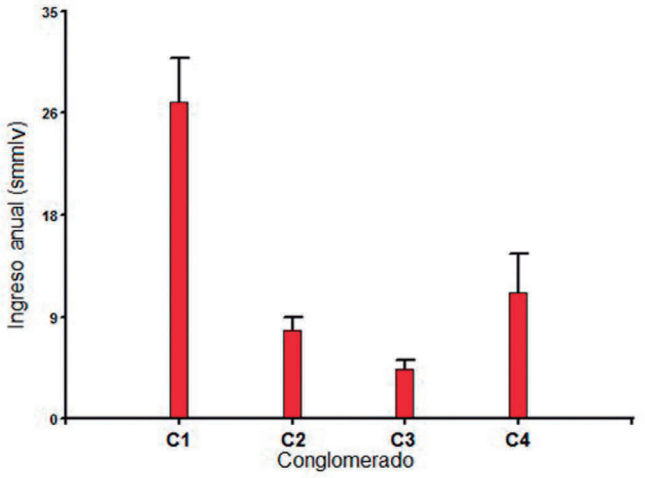

Figura 6. Ingreso anual bruto de los hogares analizados de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). Las barras corresponden al error estándar (smmlv: salario mínimo mensual legal vigente).

En efecto, la mejor capacidad adquisitiva del conglomerado 1, seguido del 4, puede expresarse en un indicador del capital económico, tal como el número de habitaciones de la residencia, que presentó diferencias significativas ($p > 0{,}0001$) entre conglomerados. En la Figura 7 se puede apreciar cómo estos dos conglomerados presentan el mayor número de habitaciones en las casas de las fincas 4,7 y 4,1 para C1 y C4, respectivamente. El C2 es el que menos capacidad habitacional tiene (una habitación en promedio), con diferencias significativas ($p < 0{,}05$) respecto de los otros grupos de hogares.

Si se divide el número promedio de habitaciones por conglomerado entre el promedio de integrantes de la familia se puede inferir que mientras en el C1 se tiene un poco más de una habitación por habitante (1,3), lo cual sería sinónimo de confort habitacional, en el C2 el cociente 0,2 sugiere que prácticamente las familias viven en hacinamiento, dado que cinco personas ocupan una habitación.

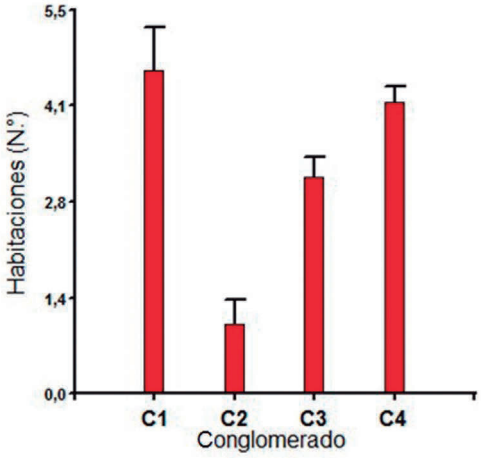

Figura 7. Indicador habitacional (número de habitaciones por habitante) en las residencias de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). Las barras corresponden al error estándar.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] (2015), el indicador habitacional muestra si los residentes viven en condiciones de hacinamiento. Una vivienda superpoblada puede tener impacto negativo en la salud física y mental, en las relaciones con otras personas y en el desarrollo de los hijos. Además, el hacinamiento suele traducirse en un suministro inadecuado de agua y servicios de alcantarillado.

1.4. Conclusiones

Las encuestas aplicadas a los productores de la zona de estudio permitieron clasificar las fincas en cuatro grupos que tipifican las correspondientes a la microcuenca. Estos resultados evidencian que predominó la diversidad productiva, tanto agrícola como pecuaria, así como la heterogeneidad social típica de las sociedades campesinas.

El estudio revela que la participación en las diferentes formas de capital social en la zona de estudio es débil. Posiblemente esto sea resultado de desconocer los pobladores las formas de participación, la precariedad de las acciones colectivas y la creciente desconfianza de la ciudadanía en la acción política, estigmatizada por las disfunciones de la gestión pública.

En las fincas analizadas el área predial constituye un criterio de diferenciación; hay tres grupos de predios con área similar a la media en la zona rural de Ibagué y se discrimina un grupo (C4) atípico referido a las fincas más

grandes de la muestra analizada. Se identificaron los usos del suelo, siendo los cultivos permanentes —especialmente café— los predominantes en los grupos C1, C2 y C3, y las pasturas y una gran área de conservación en el C4.

Es evidente la diferencia en el ingreso monetario anual estimado; los hogares del C1 son los de mayor ingreso, situación que se expresa en una mejor dotación física, manifiesta en el indicador de disponibilidad habitacional. Estas son las fincas tipificadas con tendencia cafetera, lo cual podría explicar el mejor ingreso derivado de esta actividad.

1.5. Agradecimientos

Al Comité Central de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad del Tolima por la financiación del proyecto "Servicios ecosistémicos aportados por sistemas agroforestales en laderas de la cuenca del río Combeima (Departamento del Tolima) a la gestión del recurso hídrico", código 290113, dentro del cual se desarrolló esta investigación, así como a las comunidades de la cuenca del río Combeima, que facilitaron el desarrollo de las actividades de campo y suministraron la información requerida.

1.6. Referencias

Berdegué, J., y Larrain, B. (1988). Cómo trabajan los campesinos. *Campesina*, 2. Cali: Celater.

Cabrera, V., Martínez, A., Acero, R., Castaldo, A., Perea, J. M., y Martos, J. (2004). Metodología para la caracterización y tipificación de sistemas ganaderos. *Documentos de Trabajo: Producción Animal y Gestión*, *1*(1), 1-9. Universidad de Córdoba.

Cadoche, L. (1998). *Material del Seminario de Encuestas en Educación*. México: Universidad Autónoma de Querétaro.

Carvajal, J. V., y Méndez, A. M. (2014). *Cuantificación de residuos orgánicos en agroecosistemas del cañón de Anaime para su uso en sistemas de producción animal* (Tesis de pregrado). Universidad del Tolima, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Ibagué.

Coleman, J. (1958). Relational Analysys: The Study of Social Organizations with Survey Methods. *Human Organization: Winter 1958, 17*(4), 28-36.

Comisión Colombiana de Juristas [CCJ] (2011). *La política agraria y los derechos de las mujeres en Colombia*.

Coronel, M., y Ortuño, S. F. (2005). Tipificación de los sistemas productivos agropecuarios en el área de riego de Santiago del Estero, Argentina. Problemas del desarrollo. *Revista Latinoamericana de Economía, 36*(140), 63-88.

De la Fuente, S. (2011). *Análisis de conglomerados.* Madrid: Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales.

Escobar, G., y Berdegué, J. (1990). Conceptos y metodología para la tipificación de sistemas de finca: la experiencia de Rimisp. En *Tipificación de sistemas de producción agrícola* (pp. 13-43). Santiago de Chile: Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de Producción (Rimisp).

García, C., y Calle, L. (1998). Consideraciones metodológicas para la tipificación de sistemas de producción bovina a partir de fuentes secundarias. *Revista Corpoica, 2*(2), 6-15.

Landais, E. (1998). Modelling farm diversity new approaches to typology building in France. *Agricultural Systems, 58*(4), 505-527.

León, J. A. (2006). *Estrategias de vida en familias cafeteras y su relación con la riqueza etnobotánica de fincas en el departamento de Caldas, Colombia* (Tesis de Maestría). Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza Catie, Turialba, Costa Rica.

Lozada, S., Barrios, M. I., Guío, A. J., y Muñoz, J. (2017). Caracterización biofísica de la cuenca alta del río Combeima. En *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia)* (pp. 31-61). Ibagué: Universidad del Tolima.

Malhotra, N., Dávila, J., y Treviño, M. (2004). *Investigación de mercados, un enfoque aplicado.* México: Pearson Educación.

Mora-Delgado, J. (2013). Social capital and reciprocity relations in small households from rural Andean area of Colombia (South America). *Perspectivas Rurales. Nueva época, 22*, 121-132.

Mora-Delgado, J., Calderón, J. C., y Gómez, S. M. (2011). El componente pecuario en fincas campesinas de la ecorregión cafetera del departamento del Tolima (Colombia). *Luna Azul, 32*, 16-31.

Mora-Delgado, J., Rodríguez, P., Guío, A. J., y Muñoz, J. (2017). Caracterización socioeconómica de la comunidad de la cuenca alta del río Combeima. En *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia)* (pp. 67-96). Ibagué: Universidad del Tolima.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] (2015). ¿Cómo va la vida? en cifras, capítulo 2. En ¿Cómo va la vida? 2015. *Medición del bienestar*. París: OCDE.

Rocha-Rodríguez, R., Mora-Delgado, J., y Romero-Vargas, C. (2016). Tipología de sistemas de producción en la zona rural del municipio de Ibagué, Colombia. *Agronomía Mesoamericana, 27*(2), 253-264.

Velásquez, F., y González, E. (2003). ¿Qué ha pasado con la participación ciudadana en Colombia? Bogotá: Fundación Corona.

Villardón, J. (2007). *Introducción al análisis de clúster. Universidad de Salamanca, Departamento de Estadística*. Recuperado de http://benjamindespensa.tripod.com/spss/AC.pdf.

2

Balance energético de cuatro modelos de sistemas de producción agrícola en las cuencas media y alta del río Combeima

Jairo Mora-Delgado[1,2*]; Eliana Lizeth Medina Ríos[1]; Paola Rodríguez[1]; Milena Segura[3,4,6]; Daniel Enrique Guauque Mellado[3,5]; Luz Stella Barreto Sánchez[3,5]

Resumen

Los análisis de los flujos de energía cumplen un papel importante en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuarios. Se han realizado numerosos estudios para cuantificar el flujo de energía y describir ahorros de ella al sustituir insumos convencionales por insumos orgánicos o prácticas culturales. Un total de 54 fincas campesinas de las cuencas media y alta del río Combeima, en Ibagué, fueron estudiadas mediante un análisis de conglomerados, del cual resultaron cuatro tipos de fincas. En estos tipos, por su predominancia, se identificaron cuatro modelos hipotéticos de sistemas de producción (MHSP), los cuales fueron estudiados para estimar la productividad de la energía. Las variables objeto de estudio se modelaron con el *software* Vensim 6.3, a través del cual se analizaron las interacciones entre componentes. Mediante el método de procesos se estimó la cantidad de energía invertida en insumos y mano de obra en los cuatro MHSP (pastos, mora, café libre exposición y café-plátano), para lo que se emplearon factores de conversión reportados en diversos estudios. Finalmente, dichos valores fueron convertidos a energía a fin de estimar la eficiencia energética para cada modelo, considerando los alimentos como el egreso de energía del sistema. La eficiencia energética y la productividad del MHSP de pastos fueron mayores que mora,

1 Grupo de Investigación "Sistemas Agroforestales Pecuarios" (SAFP), Universidad del Tolima.
2 Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad del Tolima.
3 Grupo de Investigación "Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales" (Proecut), Universidad del Tolima.
4 Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.
5 Estudiantes de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.
6 Grupo de Investigación en Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales
* Autor para correspondencia, correo electrónico: jrmora@ut.edu.co

café libre exposición y café-plátano. El MHSP de mora fue el menos eficiente energética y productivamente —0,0033 Gcal/kg de mora producida— que los MHSP de café libre exposición y café-plátano; aunque estos últimos mostraron alta dependencia de agroinsumos, registraron buena eficiencia energética.

Palabras clave: eficiencia, energía, productividad, sistemas de producción, Vensim.

Abstract

Analyzes of energy flows play an important role in assessing the sustainability of agricultural production systems. Several studies have been carried out to quantify the flow of energy, describing energy savings by substituting conventional inputs for organic inputs or cultural practices. A total of 54 peasant farms in the middle basin of the Combeima River, Ibagué, were analyzed by a cluster analysis, which resulted in four types of farms. In these types, by their predominance, four hypothetical models of production systems (MHSP) were identified, which were studied to estimate the productivity of the energy. The variables studied were modeled using the software Vensim 6.3, where the interactions between components were analyzed. Using the method of processes, the amount of energy invested in inputs and labor in the four MHSPs (pasture, blackberry, free coffee exposure and coffee-plantain) was estimated by using conversion factors reported in different studies. Finally, these values were converted to energy to estimate the energy efficiency for each model, considering the food as the energy output of the system. The energy efficiency and productivity of MHSP of pastures were higher than those of blackberry, coffee without shade and coffee-plantain. The MHSP of blackberry was lesser efficient in energy use and productivity (0.0033 Gcal/kg of blackberry-fruit produced) than MHSP of coffee without shade and coffee-plantain, although these showed a high dependence of agricultural inputs and a good energy efficiency.

Keywords: efficiency, energy, production systems, productivity, Vensim.

2.1. Introducción

Los análisis de balance de energía cumplen un papel importante en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuarios, por lo cual en la actualidad se realizan numerosos estudios para cuantificar el consumo de energía. La energía necesaria para la producción proviene de fuentes

muy diversas, que se pueden clasificar de acuerdo con el tiempo que tarda el ciclo de formación de la materia prima, como fuentes renovables a corto y mediano plazo, y fuentes renovables a largo plazo (Marozzi *et al.,* 2004). Se dice que una forma de medir la eficiencia de los procesos, en cuanto a la utilización de energía, es la técnica del balance energético (Simón *et al.,* 1995).

Hoy día la agricultura depende en alto grado de los productos carburantes derivados del petróleo, lo cual limita la eficiencia energética de estos sistemas de producción. Según Márquez (2017), el mayor consumo de energía en los sistemas productivos está permitiendo que haya altas producciones, siendo la agricultura moderna más eficiente en términos de incremento de unidades producidas por unidad de superficie. Sin embargo, lo anterior es válido desde una perspectiva netamente tecnofinanciera, pues si se observa detenidamente es evidente que la eficiencia energética ha disminuido de forma considerable. Aunque la actual crisis energética apunte a volver a la agricultura tradicional, esta no podría alcanzar los niveles de producción obtenidos con la agricultura moderna, los cuales de hecho son muy superiores en términos de productividad por unidad de superficie.

En la agricultura tradicional siempre se evidenció un excedente de energía, pues los productos obtenidos requerían menor energía de la invertida. Esto cambió desde hace aproximadamente 50 años, cuando con el auge del modelo agrícola conocido como Revolución Verde se empezaron a utilizar cada vez más insumos, demandantes en sus procesos de producción de altas cantidades de energía (Fluck, 1992; Helsel, 1992). Esta situación, junto con la utilización de combustibles fósiles como sustituyentes de la energía metabólica que representaba el trabajo del hombre, disminuyeron dichos excedentes (Campos & Naredo, 1980). Esto llegó a causar déficits agrarios que, aunque han permitido una mayor productividad, incluso llegando a brindar la posibilidad a algunos países de exportar alimentos, constituyeron el excedente de energía de la agricultura (Campos & Naredo, 1980).

Otros autores, como Leach (1976), afirman que los sistemas más modernos son los menos eficientes energéticamente e incompatibles con el medio ambiente. Es decir, que los procesos productivos requieren diferentes elementos y materias primas para la obtención de los productos finales. Es así como Simón *et al.* (1995) demuestran que en los balances energéticos gran cantidad de energía introducida para los procesos productivos por medio de los *inputs* generan resultados notablemente superiores a la energía obtenida en los productos finales (*outputs*).

Por otra parte, la modernización agrícola ha sido la razón principal de que la población rural, sobre todo en países desarrollados, haya disminuido drásticamente. Fernández y Labat (1982) sugieren que es precisamente la modernización la que ha incidido en la movilización de gran parte del sector rural hacia grandes ciudades, y que a su vez se lograra un incremento de la productividad. De hecho, en Estados Unidos durante el inicio de la crisis energética, entre 1950 y 1973, la población total pasó de 152 a 210 millones de personas, en detrimento de la población rural, que se redujo de 9,9 millones a 4,3 millones. Este fenómeno no causó disminución en las producciones, como resultado de los altos subsidios energéticos, que permitían una sustitución de la mano de obra rural en la producción agrícola.

Si bien la agricultura moderna es muy demandante de energía externa, no es la única causante de la crisis energética que se ve actualmente en el mundo. Fernández y Labat (1982) sustentan que el ahorro en los consumos de energía por parte del sector agrícola no representa una medida que amortigüe dicha crisis, pero que sí se verá reflejada en un mayor bienestar de los productores al incrementarse su economía. Por su parte, Uhlim (1999) menciona que las actividades agrícolas, y en general todas las actividades agropecuarias, son importantes con relación al uso de la energía en países en vías de desarrollo, pero que contrario a lo que se piensa, no son las actividades más demandantes, como sí sucede en países con alto grado de industrialización.

En la agricultura se habla del balance de energía en tres niveles: de un cultivo individual (parcela), de un sistema agropecuario (finca) y del paisaje agrario en su conjunto como una región, cuenca o estado (Van Cauwenbergh *et al*., 2006). En general, los balances energéticos se componen de *inputs* y *outputs* energéticos. El valor energético de los *inputs* agrarios incorpora la energía gastada en la transformación de los productos hasta el estado en que son usados por los agricultores y la energía bruta contenida en los propios *inputs* (Palacín & Naredo, 1980). En cuanto a los *outputs*, se considera únicamente el producto alimenticio aprovechado por el consumidor, es decir, el *output* comestible neto. Esta variable puede expresarse en tres formas: peso o volumen de alimento completo, contenido nutritivo energético y cantidad de proteína bruta (Leach, 1976). Es así como la relación entre los *inputs* o entradas energéticas y la cantidad de producto obtenido de cada sistema determinan el valor del balance energético para cada uno de los sistemas de producción. En este sentido, el objetivo de este estudio fue evaluar la productividad de la energía en cuatro prototipos de sistemas de producción de las cuencas alta y media del río Combeima (Ibagué, Colombia).

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Área de estudio

El presente estudio se realizó en la zona rural del municipio de Ibagué, departamento del Tolima, específicamente en la cuenca media del río Combeima, ubicada entre los 04º 19' 30" y 04º 39' 57" N y los 75º 10' 11" y 75º 23' 23" O, sobre el flanco oriental de la cordillera Central de los Andes en Colombia (Figura 8). Este territorio cuenta con una amplia zona rural, diversa tanto en arreglos productivos como en condiciones topográficas que van desde laderas superiores al 80% en la parte alta de la cuenca del río Combeima, hasta tierras planas en la terraza de Ibagué (Vanegas, 2002), y sus franjas altitudinales varían entre 800 y 5215 m; sin embargo, es hasta los 2600 m de altitud que se registra la actividad agropecuaria de mayor importancia. El estudio se focalizó en el corregimiento 8, microcuenca La Plata, conformada por 18 veredas, de las cuales El Retiro - El Resbalón y La Plata - El Brillante fueron analizadas.

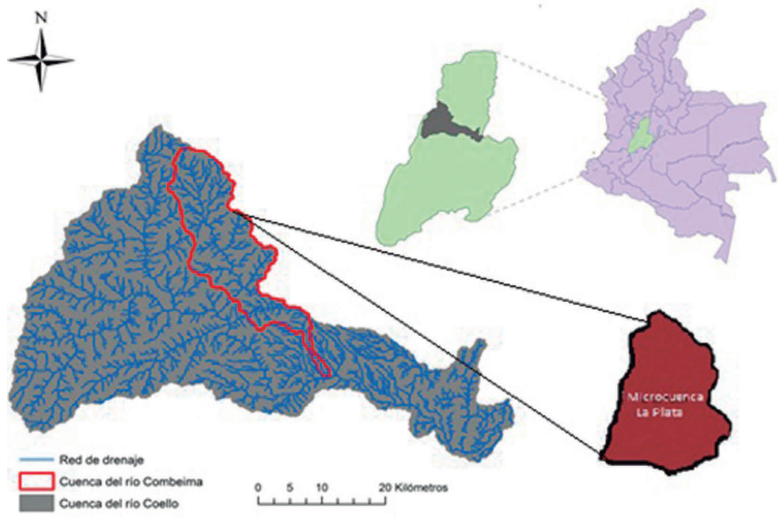

Figura 8. Localización de la cuenca del río Combeima donde se realizó el estudio.
Fuente: Mora-Delgado *et al.* (2017).

Se consultaron fuentes secundarias y se hizo un acercamiento previo a la comunidad con los líderes locales. Posteriormente, la búsqueda en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y de material cartográfico permitió obtener una aproximación del número total de predios rurales y la distribución

de los usos agropecuarios del suelo en la zona. Un análisis de la distribución predial en la cuenca del río Combeima permitió tener una idea sobre las características de la estructura agraria en la zona de estudio; así, se estimó un total de 1589 predios debidamente legalizados ante el IGAC, de los cuales 98% tienen extensión igual o menor a 100 ha (Mora-Delgado *et al.,* 2017).

En este estudio se hace referencia a los balances de energía a nivel de cultivos individuales, con el fin de poder estimar los resultados, en términos energéticos, de distintas prácticas en manejo de cultivos. De esta manera, se entenderá por energía consumida toda aquella que se le ha aportado externamente al sistema de producción, como los jornales, el empleo de semillas, fertilizantes químicos, utilización de maquinaria, gasolina y cualquier agroquímico. En lo que respecta a los abonos orgánicos y mano de obra familiar, se tendrán presentes como entradas de energía al sistema, pero no serán contabilizadas dado que hacen parte de él. La energía solar no se incluye en el cálculo de la energía consumida por el cultivo, esta es la que las plantas captan gratuitamente y transforman en biomasa vegetal (Diepenbrock, 2012).

2.2.2. Muestreo

Se realizaron reuniones con productores y caminatas por las localidades para establecer contactos directos con presidentes de organizaciones locales, quienes facilitaron el acercamiento y sensibilización de las familias ante la presencia de los investigadores, prerrequisito para recabar la información mediante entrevistas y cuestionarios. Así, se determinó cuáles de estas localidades tenían interés para el estudio. Este ejercicio exploratorio constituyó la base para un muestreo intencional, también denominado "por conveniencia".

En el muestreo intencional se seleccionaron los objetos que se estimaban representativos o típicos de la población, de acuerdo al criterio del experto o investigador para elegir las unidades que se estima pueden facilitar la información necesaria (Hernández *et al.,* 2006; Murray & Stephens, 2009; Bolaños, 2012). En este muestreo se establecieron criterios de conveniencia para la aplicabilidad de la muestra, los cuales fueron: 1) predios preferiblemente de economía campesina; 2) sistemas mixtos, con componente agrícola y pecuario, y 3) anuencia de la familia a participar en el proyecto.

Una vez obtenido el mapa productivo general de la zona, se realizó el muestreo de 54 fincas con altitudes entre 1200 y 2250 m. El estudio se realizó con pequeños y medianos productores que tienen como su principal actividad la producción agropecuaria, la cual constituye su mayor fuente de ingresos; 85% de los productores analizados se registraron como propietarios.

2.2.3. Recolección de la información

Se diseñó un cuestionario estructurado con preguntas sobre aspectos demográficos, sociales, físicos, financieros y ambientales, cuya información se tabuló en una hoja de Excel en la que se seleccionaron las variables.

2.2.4. Análisis estadístico

Se hizo un análisis de conglomerados, o análisis de clúster (AC), empleando estadística multivariada, el cual permitió implementar distintos procesos para agrupar las fincas con base en un conjunto de valores de diferentes variables (InfoStat, 2008). A partir de esta clasificación se realizaron los estudios de caso, a los que se les aplicó otro cuestionario detallado, y se analizaron las variables más relevantes para caracterizar las fincas centrómeras de cada grupo, con cuya información se crearon modelos hipotéticos de los sistemas de producción (MHSP). En el cuestionario detallado se recopiló información sobre parámetros de producción, como cantidad de jornales (familiares y contratados), agroquímicos por cada actividad y total de fertilizantes empleados en cada sistema de producción.

Los sistemas de producción objeto de estudio fueron: café sin sombrío, café con sombrío, mora, pasturas, maíz, plátano, granadilla, fríjol y yuca. Sin embargo, para el análisis de los datos obtenidos solo se trabajaron los cuatro primeros, siendo los más representativos, los que registraban la mayor información y con los cuales se analizaron los MHSP. El arreglo espacial utilizado para el modelo hipotético del MHSP de café-sombrío fue de 2500 plantas de café por hectárea, con una distancia de siembra de 2 × 2 m, barreras de plátano distanciadas cada 12 m, y nueve líneas de café entre barrera y barrera de plátano; lo anterior dio como resultado 396 unidades productivas de plátano/ha (Moreno *et al.,* 2005). Se trabajó con un supuesto de productividad anual para la totalidad del café de 625 kg café pergamino seco/ha/año, y para el plátano 396 racimos/ha/año con un promedio de peso de 20 kg/racimo.

2.2.5. Análisis energético

En cada MHSP se analizó la productividad como eficiencia energética, desde la fase de establecimiento y por período de un año, excluyéndose la cantidad de energía aportados por los insumos que exceden este período. También se contabilizó la energía derivada del uso de mano de obra, así se determinaron las diferencias de eficiencia energética entre los cuatro MHSP.

El cálculo del aporte energético del trabajo humano depende de la duración e intensidad de las labores que realicen las personas. Se ha estimado que, por término medio, el hombre desarrolla una potencia de forma continuada, durante cierto tiempo, de entre 0,13 y 0,17 CV/h. Esta potencia viene a representar un gasto de energía que oscila entre 85,44 y 111,72 kcal/h (Campos & Naredo, 1980). El abono orgánico (estiércol) no fue considerado como *input* energético, ya que este es un desecho cuyo aporte energético es de una magnitud residual comparada con la procedente de los desechos de cosechas y praderas que quedan en los suelos como raíces, pajas y pastos (Campos & Naredo, 1980).

Los insumos y la mano de obra invertidos en los cuatro sistemas de producción fueron analizados considerando tanto las acciones directas: aplicación de fertilizantes, aplicación de pesticidas, cosecha y podas, como las indirectas: energía invertida en la fabricación de los insumos (fertilizantes y agroquímicos); estos últimos, trabajados como insumos de síntesis química desde su principio activo. En cuanto a la mano de obra utilizada en los procesos de producción, se convirtieron a valores de energía estándar mediante la consulta de fuentes secundarias (Tabla 2).

Tabla 2
Contenido energético de los factores que intervienen como *inputs* en los sistemas de producción

Tipo de entrada	Unidad	Valor energético *	Fuente
Trabajo humano (medio)	h	98,58 kcal	Propuesto por esta investigación
Abonos químicos			
N (Urea)	kg de elemento puro	19 120 kcal	Leach (1976)
P (P_2O_5)		3 190 kcal	Leach (1976)
K (K_2O)		2 200 kcal	Leach (1976)
Abonos foliares	kg	0,20 Mj	Bhat *et al.* (1999)*
Herbicidas			
Glifosato (IA 41%)	kg	108 557,32 kcal	Green (1987)
2,4-D (IA 60%) (ácido -2-4 dicloro fenoxiacético)		20 421,67 kcal	Green (1987)
Fungicidas			
Mancozeb (IA 80%) (Ditiocarbamato)	kg	23 765,57 kcal	Green (1978)
Insecticidas	kg	2.200 kcal	Pimentel y Terhune (1977)

* No especifica el principio activo.

Los valores de energía aportados por el factor semillas a los sistemas productivos se obtuvieron mediante el cálculo de los jornales requeridos para su obtención. En el caso de los sistemas de mora y plátano, se trabajó con base en los datos suministrados por productores (Escobar, 2016). En los sistemas productivos de café con sombra y sin sombra el procedimiento consistió en tomar como referencia el total de horas/carga proceso del beneficio, desde la actividad de alimentación de café cereza a tolva hasta el secado (Guarín & Rúa, 2009). Con los jornales requeridos para la producción de semilla posteriormente se realizó la respectiva conversión a las unidades energéticas correspondientes.

El análisis de la energía para el sistema café-sombrío tuvo en cuenta la producción de plátano, con el fin de determinar cuál era la importancia y cómo influía este en el sistema, tanto en las entradas como en las salidas de energía. Al cuantificar el total de la energía por kilogramo de producto obtenido se utilizaron los factores de conversión para realizar transformaciones entre los estados del grano de café propuestos por Uribe (1977). Se emplearon todas las entradas energéticas en cada uno de los sistemas, excepto la energía suministrada por el sol, ya que no puede ser intervenida y sus aportes no generan ningún tipo de degradación directa al medio, caso contrario de toda aquella energía introducida por el hombre y por los insumos que allí se utilicen.

2.2.6. Modelación de los sistemas de producción

Para visualizar los componentes —jornales por actividad, fertilizantes, agroquímicos y demás actividades que hacen de los sistemas de producción— se utilizó el *software* libre Vensim versión 6.3 como herramienta de modelación, la cual permite establecer las variables e interacciones entre componentes.

2.3. Resultados y discusión

2.3.1. Descripción de los conglomerados o grupos

El dendograma (Figura 9) muestra cuatro grupos con características diferenciadoras entre sí; tres de ellos con un área similar (G1, G2 y G3), mientras que el cuarto grupo (G4) presenta mayor tamaño de fincas, es decir, las características de dichas fincas sobresalen con relación al grueso de las fincas analizadas (Tabla 2). En el estudio hubo un grupo (G1) con pocas unidades de análisis, comparado con los otros tres, el cual presentó fincas con áreas de conservación menor y un mayor porcentaje de cultivos permanentes (Tabla 3).

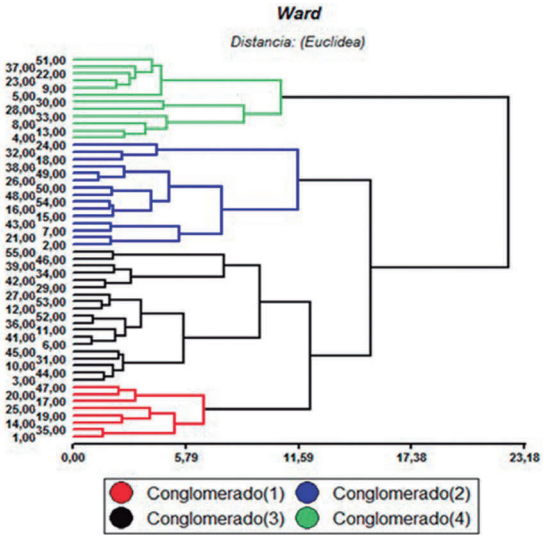

Figura 9. Dendograma del análisis de conglomerados, según la técnica de Ward, para 54 fincas del corregimiento 8, microcuenca de la quebrada La Plata, zona rural del municipio de Ibagué, Colombia (2014). G1: Grupo 1; G2: Grupo 2; G3: Grupo 3; G4: Grupo 4.

Tabla 3
Descripción de cuatro grupos de fincas con sus sistemas de producción del corregimiento 8, microcuenca de la quebrada La Plata, zona rural del municipio de Ibagué.

Conglomerado	N.° de fincas	Área de finca (ha)	Área de conservación (%)	Cultivos permanentes (%)	Pastos (%)	Cultivos transitorios (%)
1	8	2,3	0,7	83,3	1,6	14,5
2	15	2,5	4,3	78,5	4,3	13,1
3	19	2,5	17,2	76,6	1,5	4,8
4	12	14,3	50,3	19,5	28,3	2,0

Conglomerado 1: fincas pequeñas con sistemas de café; 62% de las fincas poseen café y 50% reportan el manejo de árboles como sombra. Conglomerado 2: fincas pequeñas con sistemas diversificados, donde 60% de las fincas tienen cultivos de mora y en el 60% hay árboles. Conglomerado 3: fincas pequeñas, solo en el 47% hay café, 70% de las fincas tienen cultivos de mora y en el 63% hay árboles. Conglomerado 4: fincas grandes con sistemas de pasturas para ganadería, donde en el 60% de las fincas se reporta el manejo de árboles.

2.3.2. Características de los modelos hipotéticos de sistemas de producción (MHSP)

Los sistemas de producción de café sin sombrío, café con sombrío, mora y pasturas, están localizados en las partes alta y media de la cuenca del río

Combeima y presentan características similares en cuanto a su manejo. Los habitantes de esta zona son pequeños productores, que tienen sus fincas como principal fuente de ingresos.

MHSP de café-sombrío. El sistema de café-sombrío se encuentra asociado con especies de sombra como plátano y aguacate, en proporción del 90% y 10%, respectivamente. Las labores de fertilización son dirigidas únicamente al café, por lo tanto, la fertilización que obtienen los árboles frutales es conseguida de forma indirecta. El 89% de las fincas con este sistema son propias. En el manejo del cultivo, desde la preparación de terreno hasta las labores de cosecha, el número de jornales contratados duplica al de los suministrados por la mano de obra familiar. La anterior situación se explica por el bajo número de integrantes que conforman la unidad familiar, cuyo promedio es de tres personas; además, las labores de corte y cosecha del plátano implican una gran demanda física que niños y mujeres no pueden realizar, lo que lleva al empleo adicional de mano de obra externa.

MHSP de café sin sombra. Se observó que el 100% de las fincas fueron registradas como propias y administradas por sus propietarios, donde el manejo del cultivo representa una carga laboral importante, pues utilizaron en promedio 316 jornales por año, de los cuales solo el 8% es contratado. Lo anterior representa las tendencias de las explotaciones dedicadas al minifundio. La mano de obra familiar constituye la base fundamental del sistema, ya que las labores propias de manejo del cultivo y cosecha son en gran proporción asumidas por los hijos y mujeres de la familia. La fertilización del sistema se realiza en su mayoría con urea. En el manejo de arvenses no se registra el uso de productos químicos, debido a que el control es totalmente mecánico, con machete. En este sistema se utilizan densidades de siembra altas (7500 plantas/ha), lo que arroja una productividad de 2500 kg/ha/año de café pergamino seco.

MHSP de mora. En el sistema de producción de mora el 94% de las fincas son manejadas por los propietarios. Estas unidades productivas no son dedicadas exclusivamente a la explotación de un solo producto, sino que sus áreas están divididas con lulo, granadilla, fríjol, café, plátano y maíz, generando mayor sustentabilidad de las familias. En cuanto al número de jornales, se manejan en promedio 135 por año dedicados a todas las actividades de producción; sin embargo, la mano de obra familiar representa la misma proporción que la contratada, en especial para las labores de cosecha. Lo anterior se asume debido a que la mora es un producto altamente perecedero y demanda labores de cosecha y poscosecha en el menor tiempo posible, comparado con las demás labores del mismo cultivo.

MHSP de pasturas. Las pasturas son otro sistema de producción en las fincas del cañón del Combeima, intrínseca a la ganadería, y se constituyen como

fuentes de abastecimiento para las familias que allí habitan. El empleo de mano de obra es muy bajo con respecto a los demás cultivos, pues se contempla en promedio un número de 7 jornales/ha/año, suplidos totalmente por mano de obra familiar. Los pastos, aunque no sean considerados todavía como un cultivo por los pequeños productores, constituyen la fuente de alimentación directa para la ganadería vacuna, y esta a su vez, sustento importante para las familias.

2.3.3. Modelación de los sistemas de producción

Las entradas, salidas y sus interrelaciones se pueden observar en las figuras 10, 11, 12 y 13. Estos diagramas permiten visualizar mejor su funcionamiento. En la Figura 10 se observa el diagrama causal de un cultivo de café a libre exposición, donde se hace énfasis en la relación entre las variables de producción que permiten identificar todas las entradas y salidas del sistema.

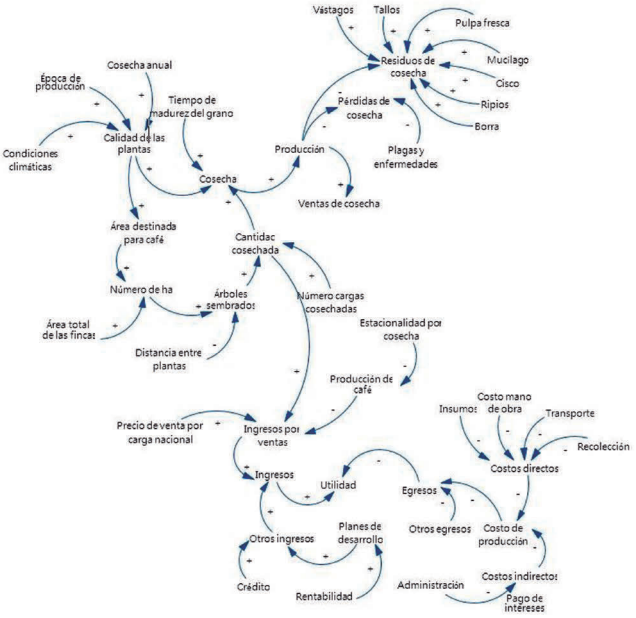

Figura 10. Diagrama causal (Vensim) de un sistema café a libre exposición analizado de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia).

El diagrama causal para el sistema de producción de café libre exposición plantea que la producción se relaciona directamente con la variable cosecha, la que a su vez es influenciada por las condiciones climáticas, la época de producción y la cosecha anual. Dichas variables interactúan de forma positiva con la variable calidad de las plantas, ya que al mejorarse las condiciones de

manejo la producción aumenta (Figura 10). No obstante, existen otras variables que también interactúan de forma positiva con la producción, la cual hace referencia al área destinada para la siembra, lo que a su vez repercute en el número de plantas por hectárea, y esto con la cantidad cosechada. Esa cosecha, que al fin de cuentas se traduce en la producción del sistema, genera unas salidas que se resumen en tres grandes variables: los residuos, las pérdidas de cosecha y las ventas resultantes de la producción (descontando las pérdidas generales).

Las interacciones observadas en todos los casos, con excepción de las plagas y enfermedades, son positivas. Lo anterior debido a que altos índices de producción no necesariamente generan mayor incidencia de plagas y enfermedades. En cuanto a los ingresos del sistema, se encuentran los indicados por la variable más directa, que es el ingreso por ventas; esto incluye utilidades por incremento en el precio de venta, créditos aprobados y, en general, por cualquier programa de desarrollo. A su vez, se puede diferenciar la variable egresos, la cual interactúa directa o indirectamente con otros costos de producción. En el caso de los costos directos, las relaciones que se diferencian son bucles con tendencias negativas, pues una mayor demanda de insumos, jornales, recolección y transporte aumenta proporcionalmente, pero de forma negativa, dichos costos directos del sistema.

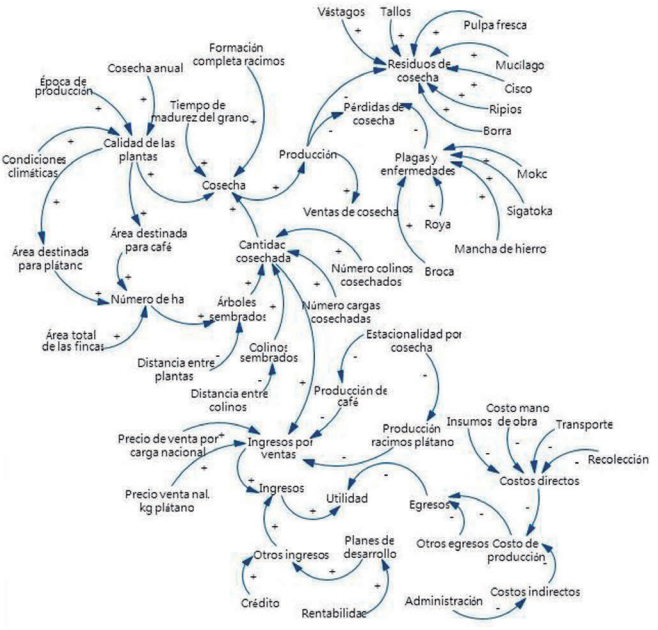

Figura 11. Diagrama causal (Vensim) de un sistema café-sombrío analizado de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia).

En la Figura 11 se presenta el diagrama causal donde se visualizan todas las variables que comprenden el sistema productivo del cultivo de café en asocio con plátano y sus relaciones. Este diagrama sugiere la importancia y el papel que desempeñan dichas variables dentro del sistema y la dirección causal. De las variables que se establecieron en el diagrama se pueden resaltar: calidad de las plantas, cosecha, producción, ingresos y egresos, pues de ahí se desprenden las demás variables que dan explicación a la dinámica del sistema.

Es posible observar que la calidad de las plantas se ve afectada directamente por factores como: clima, época de producción y cosecha anual. Las variables que indican la cantidad cosechada muestran estrecha relación con el área total de las fincas y el número de árboles y colinos (seudotallos) de plátano. Con lo anterior es posible determinar que las variables mencionadas tienen una interacción directa positiva, exceptuando la variable de plantas por hectárea. Es posible deducir que, aunque se haga un buen manejo del sistema café-plátano, su producción se verá afectada si no hay un arreglo espacial que optimice el área trabajada y permita manejar más árboles por hectárea sin afectar el desarrollo óptimo de las plantas.

De forma similar al anterior sistema de producción analizado, el sistema café-plátano genera unas salidas de producción, que se visualizan en el diagrama causal como: ventas de cosecha, pérdidas de cosecha y residuos de cosecha, todas interactuando de forma positiva, pues al incrementar presencia de plagas y enfermedades, y al no hacer un adecuado manejo poscosecha, las pérdidas de cosecha se elevan. En este sentido, puede diferenciarse que dicha producción, la cual en últimas no es más que la cantidad cosechada, genera unos ingresos y egresos que a medida que aumentan causan una interacción positiva y negativa, respectivamente (Figura 11).

El diagrama causal que se expone en la Figura 12 muestra las variables tanto internas como externas que hacen parte de la cadena productiva del cultivo de mora e influyen directamente en la producción. Diversos factores inciden en el incremento de cosecha de un cultivo. Es así como condiciones climáticas óptimas, junto con otras variables como época de producción y madurez del fruto, permiten el buen desarrollo de plantas de calidad, logrando interacciones positivas. Al ser la mora un producto altamente perecedero, las pérdidas contempladas en la variable producción son claves en el modelamiento del sistema. Las interacciones dadas en el sistema productivo de mora —variable ingresos— se consideran positivas, pues el incremento de las variables que la conforman automáticamente genera el aumento de la variable principal. Caso contrario sucede con la variable egresos, la cual contempla costos directos e indirectos que, aunque se comportan de forma directamente

proporcional a esta variable, se dan en detrimento de las utilidades finales del sistema productivo.

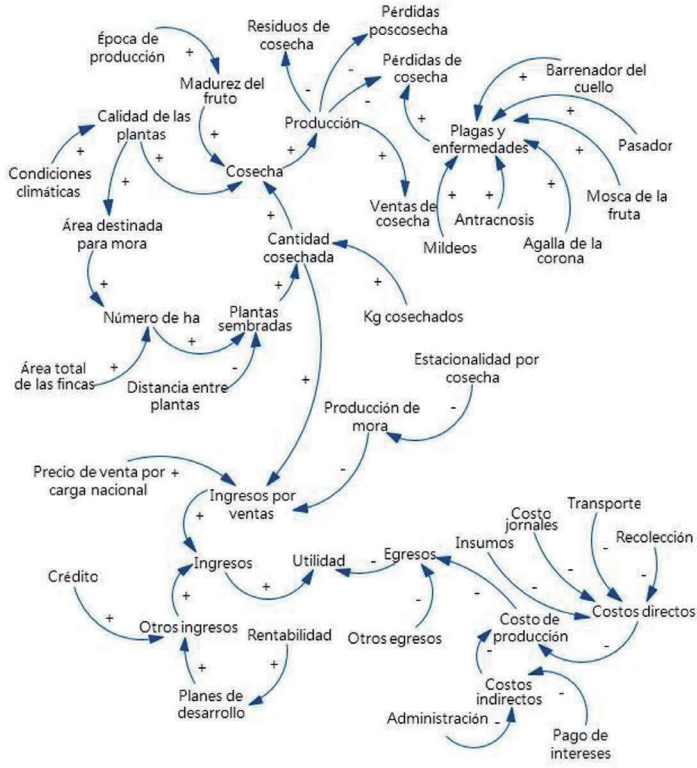

Figura 12. Diagrama causal (Vensim) de un sistema mora analizado de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia).

En el sistema de pasturas se pueden identificar las relaciones existentes entre las variables que intervienen, y todas sus entradas y salidas (Figura 13). Esto permite determinar la viabilidad en el proceso productivo. La calidad de la semilla se ve afectada directamente por factores climáticos (temperatura, altura, velocidad del viento, agua y sombra), características del suelo (profundidad, pH y drenaje), y el tiempo de almacenamiento de las semillas, lo cual influye en la cantidad cosechada, presentándose una interacción directa y positiva entre ellas. Factores como el área sembrada y la densidad también afectan las producciones del sistema, generando interacciones positivas.

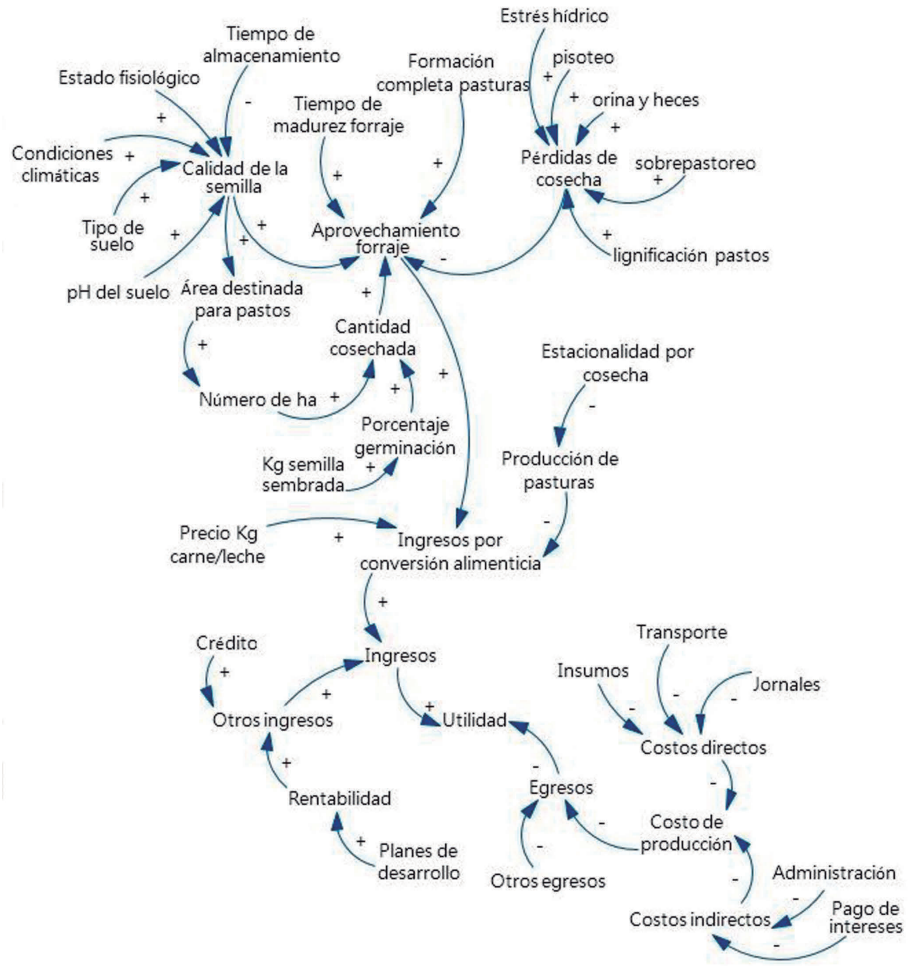

Figura 13. Diagrama causal (Vensim) de un sistema de pasturas analizado de la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia).

2.3.4. Balances energéticos de los sistemas de producción

Todas las entradas energéticas de los cuatro sistemas de producción y su eficiencia con respecto a la conversión de energía para producir un kilogramo de producto se observan en la Tabla 4. Vale aclarar que el siguiente análisis tiene como finalidad obtener una comparación de la eficiencia energética de los cuatro sistemas hipotéticos analizados; sin embargo, debido a las diferencias de producción de los sistemas no se estima una comparación real.

Tabla 4
Inputs energéticos en cuatro sistemas de producción pertenecientes a la microcuenca La Plata, cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia).

Variables	Unidades	Mora	Café	Café-plátano	Pastos
Jornales	Gcal	0,1	0,1	0,1	0,003
Fertilizantes	Gcal	2,6	6,2	3,5	2,1
Agroquímicos	Gcal	0,2	-	-	0,047
Semillas	Gcal	*	*	**	*
Total	Gcal	2,9	6,3	3,6	2,2
Total energía (productividad energética)	Gcal/kg producto	0,003	0,5 (café cereza)	0,0007 (café cereza) y 0,00019 (plátano)	0,0007 (materia seca de pasto)

* Se calculó la cantidad de jornales requeridos para la obtención de semilla que se utiliza en una hectárea (este valor se incluyó en jornales). ** Se incluyen los jornales utilizados para la obtención de los 396 colinos del arreglo espacial trabajado + obtención de semilla para 2500 plantas de café (este valor se incluyó en jornales).

El sistema de café a libre exposición es el de mejor eficiencia energética, en la medida en que para producir 1 kg de producto se invirtieron 0,5 Gcal, lo que representa 16% de la energía requerida para producir 1 kg de mora, 60% de la energía necesaria para producir 1 kg de producto en un sistema de café asociado con plátano, y un 76% de lo necesario para producir 1 kg de materia seca de pastos. Se aclara que esta comparación debe considerar que la naturaleza de los sistemas es diferente, implicando diferentes *inputs* de energía en cada caso.

Al analizar los *inputs* de jornales, la diferencia entre los sistemas de producción de café y pastos es de 0,09 Gcal, dada básicamente por la mayor cantidad de jornales que requiere el cultivo de café. Según resultados del estudio, en pastos la cantidad de energía requerida para el manejo del cultivo, en cuanto a jornales, se reduce 98% con respecto al café a libre exposición.

Los sistemas productivos de café a libre exposición y pastos tienen el mayor y el menor aporte de energía de los *inputs* generados por usar fertilizantes, con 6,2 y 2,1 Gcal/ha/año, respectivamente. El principal aporte energético en los cuatro sistemas son los fertilizantes, lo que está asociado a la alta inversión de energía contenida en estos productos de síntesis química, hacia los cuales hay alto grado de dependencia. En el caso de las pasturas cabe aclarar que la alta cantidad de fertilizantes reportados corresponde a la

dosis requerida durante el año de establecimiento, cuando los requerimientos son más altos que los utilizados por lo general en el mantenimiento los años subsiguientes, en los cuales no existe el hábito de fertilización. Esto explica por qué los sistemas productivos de mora y pastos suministran cantidades de energía muy similares vía fertilizantes, aun cuando la producción de mora demanda más energía para obtener un kilogramo de producto que el sistema pastos.

Tal como lo indican varios estudios (Institute of Food and Agricultural Sciences [IFAS], 1991; Mora-Delgado, 2004; Denoia *et al.,* 2008), el nitrógeno es el macronutriente de mayor impacto en los sistemas de producción, debido a su uso y gran aporte en el balance energético. Los aportes totales de los fertilizantes presentaron valores energéticos altos: 2,1, 2,6, 3,5 y 6,2 Gcal/ha/año para pastos, mora, café-plátano y café a libre exposición, respectivamente. El aporte energético por la aplicación de fertilizantes nitrogenados varió entre 2,0 y 5,7 Gcal/ha/año, presentando la misma tendencia. Estos hallazgos coinciden con lo planteado por Denoia *et al*. (2008), quienes encontraron que los fertilizantes aplicados como energía indirecta al sistema productivo de pastos fueron la principal forma de ingreso energético (80 kg/ha de urea a la siembra y 110 kg/ha/año adicionales divididos en aplicaciones posteriores), que representaron 85% y 84% del ingreso total de energía para pasturas, respectivamente. En este estudio el total de energía suministrada a los pastos por fertilizantes representó el 77% del total ingresada al sistema. Como se evidencia, los altos aportes energéticos de los fertilizantes nitrogenados son proporcionales a su alta demanda por parte de los sistemas productivos. La volatilización del amonio genera pérdidas de nitrógeno considerables a partir de la aplicación superficial de urea, por tanto es preciso aplicar una mayor cantidad de dicho elemento (Guerrero, 2004).

Un estudio sobre gestión energética hecho por Denoia *et al*. (2008), llevado a cabo en el departamento de Nogoyá, provincia de Entre Ríos (Argentina), reportó que para todos los cultivos analizados se emplearon altas cantidades de insumos, principalmente fertilizantes, los que representaron 51%, 55%, 59%, 72% y 88% del consumo total de energía en maíz para silo, maíz para grano húmedo, avena, raigras y pasturas, respectivamente. Lo anterior denota la alta dependencia de la agricultura a insumos generados por materiales fósiles, tal como se encontró en esta investigación.

2.4. Conclusiones

La diferencia entre los cuatro sistemas productivos analizados —mora, café a libre exposición, café-plátano y pastos— radica en los requerimientos nutricionales y de manejo, propios de cada uno de ellos. Sin embargo, las proporciones en que cada uno de estos factores influye como entradas energéticas a los sistemas se consideran similares.

Desde el punto de vista energético, se estimó que el sistema mora fue el que requirió mayor aporte de energía por cada kilogramo de producto, lo cual indica su menor eficiencia energética, seguido del sistema café-plátano, el de pastos, y café a libre exposición. Sin embargo, se debe tener en cuenta que lo anterior depende de los requerimientos propios de cada cultivo y sus condiciones de manejo agronómico.

El factor fertilizantes se constituyó en el principal importador de energía en los cuatro sistemas analizados, superando a los demás, como jornales, herbicidas, insecticidas y semillas. El nitrógeno es el macronutriente de mayor aporte energético.

La relación de gasto de energía entre los sistemas evaluados no muestra diferencias marcadas entre ellas, pero sí se refleja en la cantidad de producto obtenido; es decir, no existe relación directa entre los *inputs* ingresados al sistema y la productividad generada por cada uno de ellos.

2.5. Agradecimientos

Al comité Central de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad del Tolima por la financiación del proyecto "Servicios ecosistémicos aportados por sistemas agroforestales en laderas de la cuenca del río Combeima (departamento del Tolima) a la gestión del recurso hídrico", código 290113, dentro del cual se desarrolló esta investigación; a los estudiantes de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia que participaron en la recopilación de información; a las familias de la cuenca que suministraron la información básica.

2.6. Referencias

Bolaños, E. (2012). *Muestra y muestreo. Asignatura: Estadística para el Desarrollo Tecnológico.* México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Recuperado el 12 de julio de 2015 de http://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/tizayuca/gestiontecnologica/muestraMuestreo.pdf

Campos, P., y Naredo, J. (1980). La energía en los sistemas agrarios. *Agricultura y sociedad, 15*, 17-113.

Denoia, J., Bonel, B., Montico, S., y Di Leo, N. (2008). Análisis de la gestión energética en sistemas de producción ganaderos. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias, 7*, 1-2.

Diepenbrock, W. (2012). Energy Balance in Crop Production. *Journal of Agricultural Science and Technology, 2,* 527-533.

Fernández, J., y Labat, C. (1982). Nuevas técnicas agrarias y ahorro energético. *Agricultura y Sociedad, 24*, 137-156.

Fluck, R. (Ed.). (2012). *Energy in farm production*. Ámsterdam: Elsevier.

Green, M. (1978). *Eaten oil.* Boulder, Colorado: Westview Press.

Green, M. (1987). Energy in pesticide manufacture, distribution and use. En Z. R. Helsel (Ed.), *Energy in world agriculture* (vol. 2, pp. 165-177). Ámsterdam: The Netherlands: Elsevier.

Guarín, A., y Rúa, H. (2009). *Evaluación técnica y económica de la central de beneficio de café de la empresa agrícola Ganabro el Tablazo, del municipio de Frontino.* Doctoral dissertation, Corporación Universitaria Lasallista.

Guerrero, R. (2004). *Propiedades generales de los fertilizantes. Manual técnico* (4.ª ed.). Bogotá: Monómeros Colombo Venezolanos S. A.

Helsel, Z. (1992). Energy and alternatives for fertilizer and pesticide use. *Energy in farm production*, *6*, 177-201.

Hernández, R., Collado, F., y Baptista, P. (2006). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.

Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., González, L., Cuadroda, M., & Robledo, C. (2008). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Institute of Food and Agricultural Sciences [IFAS]. (1991). *The energy and economics of fertilizers* (en línea). Recuperado el 18 de noviembre de 2002, de http://edis.ifas.ufl.edu/BODY_EH337

Leach, G. (1976). *Energía y producción de alimentos.* Publicado por IPC Science and Technology Press para el International Institute for Environment and Development. Versión en español. España: Servicio de publicaciones agrarias.

Marozzi, M., Bellavita, G., Varela, I. (2014). Análisis comparativo de dos fincas productoras de café orgánico utilizando los métodos del balance energético y agroeconómico. *Economía y sociedad, 9* (24), 97-118.

Márquez, L. (2017). Optimización del consumo energético en la agricultura. *Revista Ambienta, 118.* Recuperado de http://www.revistaambienta.es/WebAmbienta/marm/ Dinamicas/secciones/articulos/Marquez.htm

Mora-Delgado, J. (2004). *Tecnología, conocimiento local y evaluación de escenarios en sistemas de caficultura campesina en Puriscal, Costa Rica* (Tesis de Doctorado). Universidad de Costa Rica, San José de Costa Rica.

Murray, R., y Stephens, L. (2009). *Estadística* (4.ª ed.). México: McGraw-Hill.

Palacín, P., y Naredo, J. (1980). Los balances energéticos de la agricultura española. *Agricultura y Sociedad, 15*, 163-255.

Pimentel, D., y Terhune, E. (1977). Energy and food. *Annual Review of Energy, 2*(1), 171-195.

Simón, X., Collazo, A., y Corral, J. (1995). Novas formas para medir a eficiencia: Balances enerxéticos e tempos de reproducción. En Lugo (Ed.), *Ias Xornadas de Agroecoloxía*. España: Ediciones Fouce.

Uhlin, H. (1999). Energy productivity of technological agriculture-lessons from the transition of Sweddish agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 73*, 63-81.

Uribe, A. (1977). Constantes físicas y factores de conversión en café. *Avances Técnicos Cenicafé, 65,* 1-3.

Vanegas, M. (2002). *Estudio complementario del caso Ibagué.* Convenio IDRC - OPS/HEP/Cepis Ibagué. Recuperado el 24 de abril de 2014, de http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/proyecto/complemen/ casos/ibague.pdf

Van Cauwenbergh, N., Biala K., Bielders, C., Brouckaert, V., Franchois, L. García V.,... Peeters, A. (2006). SAFE–A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 120*(2007), 229-242.

Sección II

Propiedades edafológicas en los paisajes de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia)

3

Propiedades físicas e hidrológicas en áreas con los usos del suelo dominantes en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia)

Hernán J. Andrade C.[1,2*]; Jader Muñoz Ramos[1,3,6]; Érika Sierra Ramírez[1,4,5]; Juan Fernando Gutiérrez[1,5]; Diana Skarly Canal Daza[1,2]

Resumen

El manejo de los sistemas de uso del suelo (SUS) y su impacto fueron evaluados mediante variables físicas e hidrológicas en fincas con áreas de bosque nativo y cultivos predominantes, tanto perennes como transitorios, en la microcuenca de la quebrada La Plata del municipio de Ibagué. Cada SUS —bosque natural (BN), sistema agroforestal con café [*Coffea arabica* L.] (SAFC), monocultivos de café (MC), cultivos frutales (CF) de mora [*Rubus glaucus* benth] y granadilla [*Passiflora ligularis f. lobata* (Mast.) Killip], fríjol [*Phaseolus vulgaris*] (F) y pasturas de corte (P)— contó con cinco repeticiones. Entre las variables físicas se determinó: densidad aparente (DA), densidad real, porosidad, textura y capacidad de campo a una profundidad de 0-30 cm, tomando tres muestras por parcela. La resistencia a la penetración (RP) a una profundidad de 0-60 cm y las propiedades hidrológicas de conductividad hidráulica (CH) e infiltración (I) se realizaron tres veces por parcela. No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en las variables, con excepción de la RP del suelo, que fue mayor en el cultivo de F, P y CF (624 ± 36 *vs.* 581 ± 37 *vs.* 552 ± 29 kPa, respectivamente); mientras que la DA más baja la presentaron los sistemas de

1 Grupo de Investigación "Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales" (Proecut), Universidad del Tolima.
2 Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad del Tolima.
3 Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.
4 Investigadora Asociada.
5 Estudiante de Maestría en Gestión Ambiental y Evaluación del Impacto Ambiental, Universidad del Tolima.
6 Grupo de Investigación en Cuencas Hidrográficas y Biodiversidad
* Autor para correspondencia, correo electrónico: hjandrade@ut.edu.co

P y CF (1,2 ± 0,1 g/cm^3 para ambos). El sistema de P y BN tuvieron la mayor I y CH (3,8 ± 1,6; 3,5 ± 1,1; y 4,0 ± 1,5; 3,8 ± 1,1 cm/h, respectivamente). Las prácticas agrícolas afectan las propiedades físicas y hidrológicas del suelo a lo largo del tiempo, por ende es importante generar estudios de base que den a conocer su impacto.

Palabras clave: bosques, cultivos, propiedades físicas, propiedades hidrológicas.

Abstract

The management of land use systems (LUS) and their impact were evaluated by physical and hydrological variables on farms with areas in native forest and predominant perennial and annual crops in the microbasin of La Plata in the municipality of Ibagué. Each LUS (native forest -NF, agroforestry systems with coffee (*Coffea arabica* L.) –AFSC–, monocultures of coffee (MC), fruit crops (FTC) de blackberry (*Rubus glaucus* benth) and banana passionfriut (*Passiflora ligularis f. lobata* (Mast.) Killip), bean crops (B; *Phaseolus vulgaris*) and cut and carry pastures (P) had five repetitions. The physical variables of bulk density (BD), real density, porosity, texture and field capacity at a depth of 0-30 cm, taking three samples by plot, were measured. The resistance to penetration (RP) at a depth of 0-60 cm the hydrological properties of hydraulic conductivity (HC) and infiltration (I) were carried out three times by plot. There were no significant differences ($p > 0.05$) in the variables, except for soil RP which was greater in B, P and FTC (624 ± 36 *vs* 581 ± 37 *vs* 552 ± 29 kPa, respectively); whereas the lowest BD was presented by the systems of P and FTC (1.2 ± 0.1 g/cm^3 for both). The systems of P and NF had the greatest I and HC (3.8 ± 1.6, 3.5 ± 1.1 and 4.0 ± 1.5, 3.8 ± 1.1 cm/h, respectively). Agricultural practices affect the physical and biological properties of the soil over time, so it is important to generate baseline studies that show their impacts.

Keywords: forests, crops, physical properties, hydrological properties.

3.1. Introducción

Las características del suelo están influenciadas por los sistemas de uso y su manejo (García *et al.,* 2012). De este modo, la adecuada selección de los sistemas a emplear y del manejo dado permitirá que estos provean servicios ecosistémicos, algunos globales y otros regionales y locales (Astier *et al.,* 2002).

Los servicios ecosistémicos son definidos como los beneficios que obtiene la población de los ecosistemas y se destacan la provisión de alimentos, la regulación hídrica, el control de las enfermedades, la regulación del clima, la satisfacción espiritual y el placer estético (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio [EEM], 2005). Particularmente, en los servicios locales se tienen la conservación y mejoramiento de suelos (Chará *et al*., 2015), los derivados de la biodiversidad y regulación hídrica; mientras que el servicio global más ampliamente reconocido es la captura de carbono atmosférico para la mitigación del cambio climático (Alvarado *et al.,* 2013).

El caso de la cuenca del río Combeima es muy importante por ser la encargada de suministrar el agua potable a cerca de 127 276 suscriptores registrados a diciembre de 2015, por lo cual integra un número importante de habitantes, empresas industriales, comercio y producción agropecuaria (Segura & Andrade, 2017). El río Combeima tiene una longitud de 57 km y drena una cuenca de aproximadamente 27 421 ha (Hernández, 2013), la cual está conformada por 18 microcuencas, entre las que se destacan las quebradas Las Perlas, La Plata, Cay y El Tejar. La geomorfología de la cuenca evidencia deformaciones asociadas a la acción de fallas geológicas importantes, tal como Otú-Pericos, La Honda y la Falla de Ibagué, que controlan la actividad tectónica de la región (Cuéllar *et al*., 2014). Estas grandes fallas dieron origen a procesos denudacionales-estructurales que imprimieron una topografía abrupta en la parte alta-media de la cuenca (entre 1300-5000 m), y moderadamente inclinada a suave en la parte media-baja (entre 800-1300 m) (Hernández, 2013). En el caso de la microcuenca La Plata, se presentan pendientes de hasta 75% (Alcaldía de Ibagué, 2013).

Las partes altas de la cuenca se destinan actualmente a conservación, mientras que en las fincas ubicadas en las partes media y baja se han establecido diversos sistemas productivos (Losada *et al.,* 2017) que suplen parte de las necesidades alimenticias de Ibagué. No obstante, el uso del suelo se ha determinado sin tener en cuenta la aptitud de este, conflicto que ha conllevado la exacerbación de amenazas como inestabilidad de laderas por aumento de la susceptibilidad a remociones en masa e inundaciones (Cortolima, 2006). Los impactos generados a este recurso por las prácticas inadecuadas agotan los nutrientes y disminuyen la productividad, lo cual ocasiona menores rendimientos de las cosechas e incrementos en el precio de los alimentos, lo que a su vez afecta negativamente el estado nutricional de las familias y, por ende, incrementa la pobreza (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2005).

La calidad del suelo se puede definir mediante indicadores físicos, químicos y biológicos, entre los que sobresalen el carbono orgánico del suelo (COS), la densidad aparente (DA), la disponibilidad de nutrientes, el contenido

de humedad y la conductividad hidráulica. Shukla et al. (2006) afirman que la aireación y la agregación, las cuales se relacionan con la DA y la concentración de COS, son los factores más claves para definir la calidad de un suelo. La DA influye en mayor grado sobre la productividad debido a la relación con otras propiedades del suelo, como el contenido de materia orgánica (MO), la textura, las prácticas de manejo y el contenido de humedad (Salamanca & Sadeghian, 2005). Valores de DA cercanos a 1 g/cm^3 son ideales para la agricultura (Rojas, 2016).

Factores físicos como la compactación, resistencia a penetración, porosidad y textura determinan la posibilidad de que los nutrientes entren en solución y definen su disponibilidad para los cultivos. Otras propiedades físicas determinan si estos nutrientes pueden ser percolados y perdidos por lixiviación o escorrentía en forma de sedimentos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 1993). La conductividad hidráulica (CH) y la velocidad de infiltración (I) son características físicas claves para definir la salud de un suelo; la primera depende de la estructura del suelo, el contenido de humedad y la temperatura del agua (Filgueira *et al.,* 2006), mientras que cuando la segunda es nula o muy baja ocasiona escurrimiento y da inicio a los procesos erosivos (Castellanos *et al.,* 2013).

En este contexto, el objetivo del estudio fue estimar el impacto de los principales sistemas de uso del suelo en las propiedades físicas e hidrológicas de los suelos de la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). Los resultados permitirán definir cuáles sistemas de uso del suelo son más amigables con el medioambiente, principalmente en términos de estas propiedades que afectarán el crecimiento y productividad de los cultivos, y mejoran la oferta del servicio ambiental de regulación hídrica.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Área de estudio

Este estudio se desarrolló en la microcuenca La Plata, ubicada en la cuenca media del río Combeima (Tolima, Colombia) (Figura 14). Dicha microcuenca ha sido priorizada por Barrios *et al.* (2017) para establecer allí un esquema piloto de incentivo económico de compensación por servicios ecosistémicos, en especial por regulación hídrica. Además, en ella se encontraron los sistemas predominantes de uso del suelo en la cuenca del río Combeima, definidos en la primera etapa de este proyecto (ver capítulo 1).

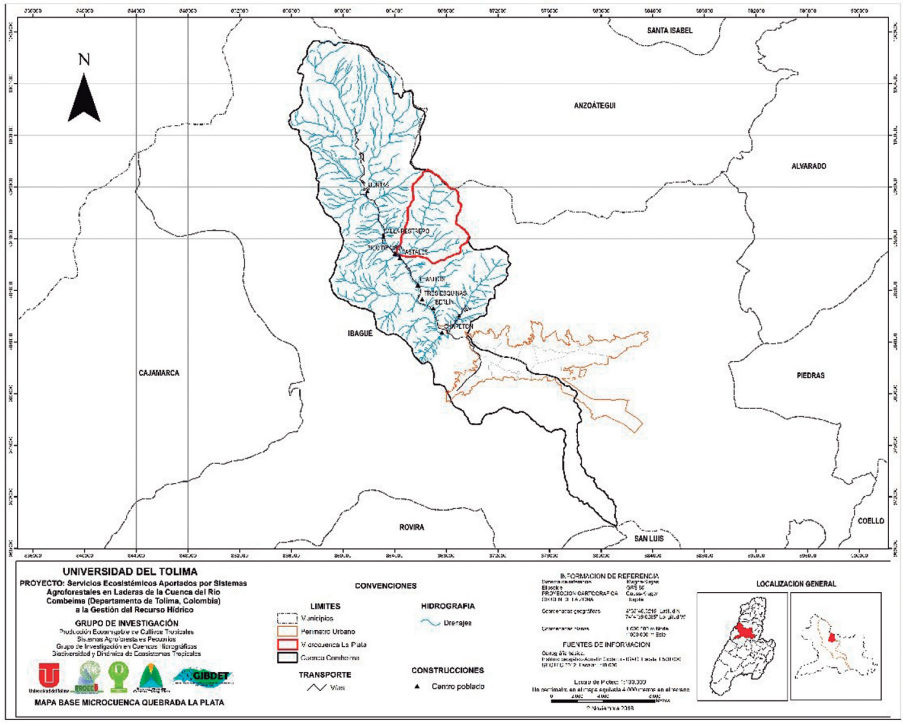

Figura 14. Mapa de localización de la microcuenca de la quebrada La Plata (Ibagué, Colombia).

3.2.2. Usos del suelo

Se evaluaron variables edafológicas físicas e hidrológicas en los siete usos del suelo más dominantes del área de estudio: bosque natural (BN), sistema agroforestal con café (SAFC, *Coffea arabica* L.), monocultivos de café (MC), cultivos frutales (CF) de mora (*Rubus glaucus* benth) y granadilla (*Passiflora ligularis f. lobata* (Mast.) Killip), fríjol (F; *Phaseolus vulgaris*) y pasturas de corte (P) (Mora *et al.*, 2017) (Figura 15). De cada sistema de uso del suelo se seleccionaron cinco repeticiones en fincas de productores, las cuales se encontraban en la misma ladera para minimizar el efecto del tipo de suelo y pendiente.

Figura 15. Panorámica del paisaje agropecuario y forestal de la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia).

3.2.3. Muestreo de suelos

Las variables físicas del suelo se analizaron aplicando diferentes métodos con los que se tomaron muestras disturbadas y sin disturbar, de acuerdo a la naturaleza de cada una. La DA y la densidad real (DR) se estimaron a una profundidad de 0 a 30 cm, tomando tres muestras por cada unidad de muestreo con el método del cilindro de volumen conocido para el caso de la aparente (Figura 16) y con el picnómetro para la DR (Sandoval *et al.*, 2011). La porosidad (P) se estimó con base en la DA y la DR, por medio de la siguiente fórmula (Jaramillo, 2002):

$$P = \frac{Dr - Da}{Dr} x\ 100$$

donde:

P : Porosidad (%)
Dr : Densidad real (g/cm^3)
Da : Densidad aparente (g/cm^3)

Figura 16. Muestreo de suelos para determinación de DA y DR en sistemas de uso del suelo dominantes en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia).

Las muestras disturbadas a una profundidad de 0 a 30 cm fueron tomadas para estimar la textura (T) por el método de Bouyoucos (Sandoval *et al.,* 2011) y la capacidad de campo (CC) por el método de platos de presión en una muestra compuesta por parcela. La resistencia a penetración (RP), la I y la CH fueron medidas *in situ* de muestras no disturbadas en tres sitios por parcela. La RP fue estimada con el penetrómetro manual, tomando registros cada 10 cm en el perfil del suelo hasta una profundidad de 60 cm en tres sitios por parcela de muestreo. La I se estimó empleando el método de anillos concéntricos (Figura 17a), midiendo la altura de la lámina infiltrada en el anillo interno a diferentes intervalos de tiempo, iniciando cada minuto y luego cada 2, 5, 10, 15, 20, 30 min hasta completar la prueba (cerca de 2 h). La altura de la lámina de agua en el anillo externo siempre se mantuvo constante durante el transcurso de la prueba. La velocidad de I se estimó como la diferencia entre láminas de agua en el tiempo transcurrido. La CH se estimó enterrando un tubo de PVC de 4´´, unos 15 cm dentro del suelo (Figura 17b) y se aplicó el mismo procedimiento que en la prueba de infiltración, empleando intervalos de tiempo crecientes.

Figura 17. Elementos utilizados para los ensayos *in situ* de infiltración (a) y conductividad hidráulica (b) en suelos bajo sistemas de uso predominante en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). a: doble anillo concéntrico para prueba de infiltración; b: tubo de PVC usado para prueba de conductividad hidráulica.

3.2.4. Análisis estadístico

Se empleó un diseño completamente al azar balanceado, en el cual los tratamientos consistieron en los seis sistemas de uso del suelo —bosque natural (BN), sistema agroforestal con café (SAFC), monocultivos de café (MC), cultivos frutales (CF) de mora y granadilla, fríjol (F) y pasturas de corte (P)—, cada uno con cinco repeticiones. Los análisis de varianza se realizaron previa prueba de los supuestos estadísticos. En caso de encontrar diferencias estadísticas entre sistemas ($p < 0,05$) se realizaron pruebas de diferencias de medias de Tukey, con el mismo nivel de significancia, para observar diferencias entre pares de tratamientos. Todas las pruebas se hicieron mediante el uso del programa InfoStat (versión 2015).

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Características físicas

No se detectaron diferencias estadísticas ($p > 0,05$) en DA, P, T y CC entre los sistemas de uso del suelo (Tabla 5), mientras que la RP sí presentó algunas diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ellos. La DA fue mayor en los SAFC, seguido de los MC; por su parte, las P y CF presentaron la menor DA (1,5 ± 0,1 *vs.* 1,4 ± 0,1 *vs.* 1,2 ± 0,1 *vs.* 1,2 ± 0,1 g/cm^3, respectivamente). En contraste, Alvarado *et al.* (2013) reportan en sistemas de producción de café en el municipio del Líbano (Tolima) una DA menor en SAF con plátano que en café en monocultivo y SAF con nogal (*Cordia alliodora*) (0,83 *vs.* 0,88 *vs.* 0,92 g/cm^3, respectivamente). Entretanto, Jaurixje *et al.* (2013) encontraron que la DA en sistemas con cultivo de aguacate y en pasto obtuvo el valor más bajo comparado con el cultivo de cebolla (1,3 *vs.* 1,3 *vs.* 1,4 g/cm^3, respectivamente), atribuido al efecto del pasto sobre las propiedades físicas del suelo y al tiempo de descanso en el cultivo de aguacate. Los resultados de este estudio sobrepasan los valores óptimos de DA (0,7-0,9 g/cm^3), los cuales afectan el crecimiento del sistema radicular de los cultivos, la aireación, el movimiento del agua y el flujo de nutrientes. Sin embargo, en todos los sistemas se encontró una P mayor del 40%, lo que se considera un suelo bien aireado para el desarrollo radicular de las plantas de cultivo (Volverás *et al.,* 2016). La CC fue contrastada en BN y P, siendo la mayor en el primer caso y la menor en el segundo sistema (21,4 *vs.* 16,4%, respectivamente) (Tabla 5).

Aunque la textura no es afectada por el manejo ni el sistema de uso del suelo, se detectó que todos los suelos presentaron una clase textural franco-arcillo-arenosa, donde los contenidos de arena, limo y arcilla fueron estadísti-

camente similares ($p > 0,05$). Esto demuestra la homogeneidad de los suelos y afirma que los cambios detectados en otras propiedades podrían ser atribuidas a la interacción entre uso del suelo y su manejo. Cabe resaltar que la textura encontrada en los suelos estudiados fue la que mejor equilibrio presenta entre sus separados, lo cual muestra un excelente potencial por su nivel de fertilidad y condiciones adecuadas de drenaje (Jaramillo, 2002).

La RP fue la única propiedad física que pareció afectarse significativamente ($p < 0,05$) por el uso del suelo. Así, los suelos más compactos, debido a una mayor RP, fueron los F, P, CM y CF (624, 581, 554 y 552 kPa, respectivamente), diferentes estadísticamente ($p < 0,05$) que los SAFC y los BN (516 y 334 kPa, respectivamente) (Tabla 5). En esta variable se observa el impacto del componente arbóreo, ya que los sistemas con alto componente de este tipo de plantas presentan menor RP, lo cual está relacionado con la salud del suelo al permitir mayor aireación, almacenamiento de humedad y expansión radicular (Sellés *et al*., 2012). Estudios realizados por Ingaramo *et al.* (2003) y Jaurixje *et al.* (2013) afirman que la compactación por algunas labores de uso del suelo afecta el crecimiento de las plantas; esto aumenta la DA y a su vez incrementa la resistencia mecánica, disminuye la P y, por ende, hay menor aireación para el sistema radicular en plantas. Es decir, cualquier actividad que modifique la estructura del suelo de forma negativa disminuye su capacidad productiva.

Tabla 5
Características físicas de los suelos en los sistemas de uso del suelo predominantes en la microcuenca La Plata, municipio de Ibagué (Colombia), 2017.

Sistemas de uso del suelo	Densidad aparente (g/cm^3)	Porosidad (%)	Textura (%)			Capacidad de campo (%)	Resistencia a penetración (kPa)
			Arcilla	Limo	Arena		
Bosque	1,3 ± 0,2 a	48,3 ± 9,1 a	19,3 ± 0,5 a	15,6 ± 0,7 a	65,1 ± 0,7 a	21,4 ± 2,3 a	334 ± 20 c
Café	1,4 ± 0,1 a	45,0 ± 5,5 a	20,1 ± 0,7 a	17,2 ± 1,0 a	62,7 ± 1,4 a	17,5 ± 1,2 a	554 ± 31 ab
Fríjol	1,3 ± 0,1 a	49,3 ± 4,4 a	22,1 ± 1,2 a	18,4 ± 0,4 a	59,5 ± 1,3 a	20,6 ± 1,6 a	624 ± 36 a
Pastura de corte	1,2 ± 0,1 a	50,2 ± 4,2 a	19,7 ± 0,8 a	18,0 ± 0,6 a	62,3 ± 1,0 a	16,4 ± 0,5 a	581 ± 37 ab
Cultivos frutales	1,2 ± 0,1 a	50,8 ± 5,3 a	20,8 ± 1,4 a	17,7 ± 1,0 a	61,5 ± 2,1 a	20,7 ± 1,8 a	552 ± 29 ab
SAF-café	1,5 ± 0,1 a	41,0 ± 3,8 a	20,5 ± 1,3 a	18,4 ± 1,0 a	61,1 ± 1,9 a	20,1 ± 1,7 a	516 ± 30 b

SAF: sistemas agroforestales. Valores corresponden a medias ± error estándar. Sistemas con letras iguales indican que no son estadísticamente diferentes según la prueba de Tukey ($p > 0,05$).

3.3.2. Características hidrológicas

Aunque no se detectaron diferencias estadísticas ($p > 0,05$) en la CH e I entre sistemas de uso del suelo (Figura 18), es importante describir algunas tendencias y leves diferencias encontradas. Las P y los BN presentaron las mejores propiedades hidrológicas de los suelos al tener los mayores valores de CH e I, superando a los demás sistemas entre un 20% y 56% (Figura 18). La mayor CH se encontró en el sistema de P, seguida de BN, y la más baja en los sistemas de CP (4,0 ± 1,5 *vs.* 3,8 ± 1,1 *vs.* 2,3 ± 0,9 cm/h, respectivamente). Asimismo, la I fue superior en el sistema de P y menor en el MC (3,8 ± 1,6 *vs.* 1,7 ± 0,8 cm/h, respectivamente).

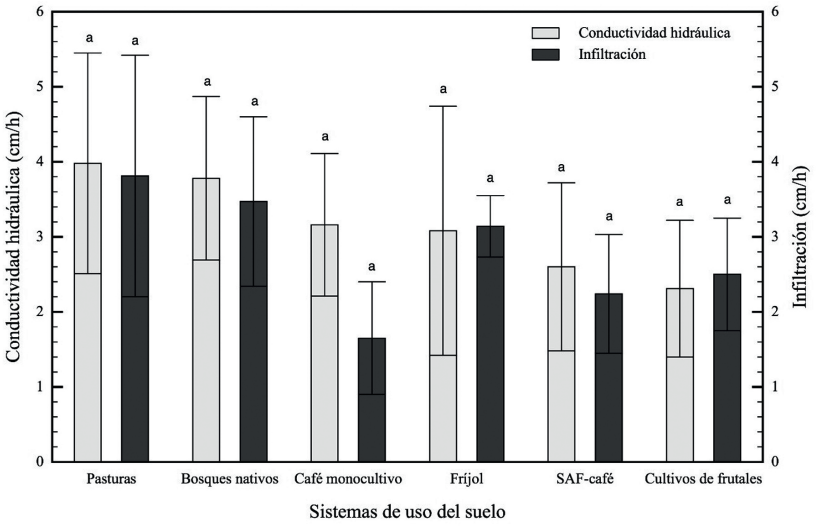

Figura 18. Conductividad hidráulica e infiltración en suelos de ladera en los principales sistemas de uso del suelo en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). Las barras de error corresponden a error estándar. Medias con una letra común indican que no son estadísticamente diferentes según la prueba de Tukey ($p > 0,05$).

Sanzano *et al.* (2005) encontraron diferencias significativas en la I entre los sistemas de manejo evaluados, siendo estos valores superiores a los encontrados en este estudio: el BN presentó mayor valor que los sistemas de siembra directa y pasturas de gramíneas (18,2 *vs.* 8,1 *vs.* 6,8 cm/h, respectivamente). En cambio, en suelos con labranza convencional la I (3,2 cm/h) fue muy similar a lo hallado en los sistemas de BN, F y P de este estudio (Figura 18). Asimismo, la CH fue superior en bosque que los demás usos evaluados por ellos, a diferencia de lo encontrado por estos mismos autores, quienes afirman que las P presentaron el mayor valor aunque sin diferencias significativas ($p > 0,05$) respecto de los demás sistemas.

Las propiedades físicas analizadas son indicadores de la salud de los suelos, ya que se relacionan con la aireación y agregación del suelo (Shukla *et al.*, 2006). La pérdida de suelo se debe a factores abióticos como el viento y la lluvia, y a las actividades antrópicas relacionadas con las malas prácticas agrícolas como la mecanización excesiva, la no rotación de cultivos, el pastoreo abusivo y el uso de agroquímicos (Abouhamad *et al.,* 2017). Conocer el impacto de los sistemas de uso es clave para definir estrategias de manejo al punto que se maximicen los beneficios financieros y ambientales. De esta forma, en un potencial proyecto de pago por servicios ambientales para el mejoramiento hídrico es posible definir sistemas de uso del suelo amigables con el medioambiente, pero no tan rentables financieramente, e incentivar a los productores locales para que los manejen en áreas estratégicas de esta cuenca (Segura & Andrade, 2017).

3.4. Conclusiones

Las propiedades físicas analizadas, con excepción de la resistencia a penetración, no fueron afectadas estadísticamente por el uso del suelo. Sin embargo, los sistemas de uso del suelo con árboles, tal como los bosques y SAF con café, mejoraron sus características físicas al reducir la compactación de los suelos, empleando la resistencia a la penetración como indicador.

Los bosques y pastos de corte presentaron los mejores indicadores en cuanto a la regulación hídrica: mayor conductividad hidráulica e infiltración. Lo anterior indica lo amigables que son estos sistemas de uso del suelo y sus posibilidades de ser involucrados en proyectos de pagos por servicios ambientales para el mejoramiento del suministro hídrico a Ibagué.

Es importante resaltar que Ibagué y el departamento del Tolima requieren medidas eficaces para evitar la disminución de los servicios ecosistémicos, lo cual incrementa la susceptibilidad de la población a la continua degradación del suelo. Esto indica la gran relevancia de comprender las relaciones entre el clima, el suelo y las prácticas de manejo a fin de generar sistemas productivos sostenibles.

3.5. Agradecimientos

Los autores agradecen a los habitantes de la cuenca media del río Combeima por permitir el ingreso y la toma de muestras en los predios; a la Oficina Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima por la financiación del proyecto de alianza de grupos con código 290113 y los integrantes de los grupos de investigación aliados a este proyecto.

3.6. Referencias

Abouhamad, S. L., Rojas, M. V., Méndez, J. L., Salazar, K., y Salmerón, A. L. (2017). Servicios ecosistémicos de regulación que benefician a la sociedad y su relación con la restauración ecológica. *Biocenosis, 31*(1-2).

Alcaldía de Ibagué (2013). *Estructura ecológica principal municipal*. Recuperado de https://issuu.com/elnuevodia/docs/documento_estructura_ecologica_prin

Alvarado, J., Andrade, H. J., y Segura, M. A. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* l.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal, 16*(1), 20-31.

Astier, M., Maass, M., y Etchevers, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia, 36*(5), 605-620.

Barrios, M., Losada, S., Guío, A., y Muñoz, J. (2017). Priorización de sitio para aplicar un incentivo económico de compensación por servicios ecosistémicos en la cuenca alta del río Combeima. En J. Muñoz y A. Guio (Eds.), *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia)* (pp. 101-159). Ibagué: Universidad del Tolima.

Castellanos, A., Chocobar, A., Cox, R., Fonteyne, S., Govaerts, B., Jespers, N,... Verhulst, N. (2013). *Infiltración. Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo*. México: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (Cimmyt).

Chará, J., Camargo, J., Calle, Z., Bueno, L., Murgueitio, E…, Molina, J. (2015). Servicios ambientales de sistemas silvopastoriles intensivos: mejoramiento del suelo y restauración ecológica. En: F. Montagnini, E. Somarriba, E. Murgueitio, H. Fassola, y B. Eibl (Eds.), *Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. Serie técnica. Informe Técnico 402, Catie, Turrialba, Costa Rica. Cali: Editorial Cipav.

Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima] (2006). *Proyecto Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica mayor del río Coello. Amenazas y riesgos naturales.* Convenio Cortolima-Corpoica-Sena-Universidad del Tolima. Recuperado de http://www.cortolima.gov.co/2006/images/stories/centro_documentos/coello/A_1_CARACTERISTICAS_AREA_ESTUDIO.pdf

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio [EEM] (2005). *Ecosystems and Human Well-being*. Washington: Synthesis. Island Press. Recuperado de http://www. millenniumassessment.org/es/index.html

Filgueira, R. R., Soracco, C. G., Sarli, G. O., y Fournier, L. L. (2006). Estimación de propiedades hidráulicas de suelos por mediciones a campo y el uso de modelos de flujo estacionario y transitorio. *Ciencia del suelo*, *24*(1), 39-48.

García, Y., Ramírez, W., y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y forrajes*, *35*(2), 125-138.

Hernández, Y. (2013). *Caracterización y análisis de la amenaza y vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca de la quebrada Cay, Ibagué, departamento del Tolima* (Tesis de Maestría en Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas).

Ingaramo, O., Paz, A., y Dugo, M. (2003). Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelo, en el NO de la Península Ibérica. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*, 1-4.

Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Jaurixje, M., Torres, D., Mendoza, B., Henríquez, M., y Contreras, J. (2013). Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, Estado Lara. *Biagro*, *25*(1), 47-56.

Losada, S., Barrios, M., Guío, A., y Muñoz, J. (2017). Caracterización biofísica de la cuenca alta del río Combeima. En J. Muñoz y A. Guío (Eds.), *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia)* (pp. 31-63). Ibagué: Universidad del Tolima.

Mora, J., Rodríguez, P., Guío, A., y Muñoz, J. (2017). Caracterización socioeconómica de la comunidad de la cuenca alta del río Combeima. En J. Muñoz y A. Guío (Eds.), *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia)* (pp. 67-98). Ibagué: Universidad del Tolima.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (1993). *Erosión de suelos en América latina*. ISBN 92-854-3001-5. Roma, Italia. Recuperado de http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S00.htm#Contents

Organización Mundial de la Salud [OMS] (2005). *Ecosistemas y bienestar humano: Síntesis sobre salud. Un informe de la Evaluación de los Ecosistemas*

del Milenio (EM) / Equipo de autores principales: Carlos Corvalán, Simon Hales y Anthony McMichael; equipo extendido de autores: Colin Butler *et al*.; revisores: José Sarukhán *et al*.

Rojas, A. S. (2016). *Existencias de carbono orgánico del suelo en paisajes rurales altoandinos de Santa Isabel, Tolima, Colombia* (Trabajo de grado). Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Agronómica, Ibagué.

Salamanca, A., y Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé, 56*(4), 381-397.

Sandoval, M., Dörner, J., Seguel, O., Cuevas, J., y Rivera, D. (2011). *Métodos de análisis físico de suelos*. Chile: Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo.

Sanzano, G. A., Corbella, R. D., García, J. R., y Fadda, G. S. (2005). Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ciencia del suelo*, *23*(1), 93-100.

Segura, M., y Andrade, H. (2017). Valoración financiera del servicio ecosistémico de regulación hídrica en la cuenca alta del río Combeima. En J. Muñoz y A. Guío (Eds.), *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia*) (pp. 177-204). Ibagué: Universidad del Tolima.

Sellés, van Sch., Ferreyra, E. R., Ruiz, R., Ferreyra, R., y Ahumada, R. (2012). Compactación de suelos y su control, estudio de caso en el valle del Aconcagua. Boletín *INIA* núm. 234, Chile.

Shukla, M. K.; Lal, R., Ebinger, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research, 87*, 194-204.

Volverás, B., Amézquita, E., y Campo, J. (2016). Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *17*(3), 361-377.

4

Impacto de los usos del suelo en las propiedades químicas de los suelos en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia)

Hernán J. Andrade C.[1,2], Érika Sierra Ramírez[1,4],
Diana Skarly Canal Daza[1,2], Milena A. Segura M.[1,3]

Resumen

Los suelos constituyen uno de los más importantes recursos naturales, al ser un factor clave para el crecimiento y producción de las plantas. Las propiedades de los suelos se afectan por factores como su génesis, clima, uso y manejo. El objetivo de este capítulo es estimar el efecto de los sistemas de uso del suelo (SUS) en las principales propiedades químicas de los suelos, a una profundidad de 0-30 cm. Se evaluaron los SUS más dominantes en la microcuenca de la quebrada La Plata (Ibagué, Colombia) —bosques nativos (BN), monocultivo de café, sistemas agroforestales con café, cultivos de frutales, cultivos de fríjol y pasturas de corte— empleando un diseño completamente al azar balanceado con cinco repeticiones. En cada parcela se realizó un muestreo para tomar una muestra de suelo compuesta que se analizó químicamente (pH, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, fósforo, calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, cobre, zinc, manganeso, boro, azufre y aluminio). Se encontró que los SUS no afectaron ninguna característica química de los suelos; sin embargo, los BN presentaron un nivel levemente superior de pH que los otros sistemas, indicando la posibilidad de una acidificación de los suelos al destinarlos a usos agropecuarios. Las prácticas agrícolas a lo largo del tiempo afectan las propiedades químicas del suelo, lo cual sugiere la importancia de generar estudios para conocer el estado de la salud de los suelos en diferentes SUS y gestionar estrategias de uso sostenible.

Palabras clave: bosques, cultivos, elementos mayores, elementos menores, materia orgánica, pH.

1 Grupo de Investigación "Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales" (Proecut), Universidad del Tolima.
2 Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad del Tolima.
3 Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.
4 Investigadora Asociada.
* Autor para correspondencia, correo electrónico: hjandrade@ut.edu.co

Abstract

Soils are one of the most important natural resources, being a key factor for growth and production of plants. The soil properties are affected by, among some factors, its use and management. The objetive of this chapter was to estimate the effect of land use systems (LUS) in the main chemical properties of soils, at a depth of 0-30 cm, as support for plants. The most dominant LUS (native forests –NF-, coffee monoculture, agroforestry systems with coffee, fruit tree crops, bean crops and grass for cutting and carrying) employing an competely random design with five replications. In each sampling plot, a soil sampling was carried out to take a sample that was chemically analized (pH, cationic exchange capacity, organic matter, phosphorus, calcium, magnesium, sodium, potassium, iron, copper, zinc, manganese, boron, sulphur and aluminum). It was found that LUS did not affect the chemical characteristics of the soils; however, NF showed the slightly higher level of pH than other systems, indicating the possibility of a accidification of soil when they are converted to agricultural and livestock uses. The agricultural practices in the time affect chemical characteristics of soil which suggest the importance of generating studies to know the status of the soil health in the different LUS and manage sustainable use strategies.

Keywords: forests, crops, mayor elements, minor elements, organic matter, pH.

4.1. Introducción

La capacidad del suelo para sostener la vida actual y futura en el planeta está siendo afectada por la perturbación antrópica que modifica su compleja formación física, química y biológica (Lambin *et al.,* 2001; Espinosa *et al.,* 2011). Las alteraciones a las coberturas y usos del suelo amenazan la diversidad biológica (Sala *et al.,* 2000); aportan al cambio climático local, regional y global (Houghton *et al.,* 1999), así como a la degradación (Tolba & El-Kholy, 1992; Espinosa *et al.,* 2011), y modifican la actividad y la oferta de los beneficios que aportan los ecosistemas (Vitousek *et al.,* 1997). Los servicios ecosistémicos se pueden dividir de acuerdo con su escala geográfica; así, entre los servicios locales se tienen los derivados de la conservación y mejoramiento de suelos, y la regulación hídrica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente], 2016); entretanto, el servicio global más ampliamente reconocido es el almacenamiento de carbono atmosférico para la mitigación del cambio climático (Panel Intergubernamental de Cambio climático [IPCC], 2005; Alvarado *et al.,* 2013; Andrade *et al.,* 2016).

La cuenca del río Combeima es considerada de gran importancia al ser la principal abastecedora de agua para el consumo humano, industrial y agropecuario en el abanico de Ibagué (Segura & Andrade, 2017). El río Combeima posee una longitud de 57 km y drena una cuenca de aproximadamente 27 421 ha, constituida por 18 microcuencas, entre las que sobresalen las quebradas La Plata, Las Perlas, Cay y El Tejar (Hernández, 2013). La cuenca está conformada por dos unidades de relieve con topografías contrastantes: a) una zona montañosa, de topografía muy escarpada, que abarca la mayor extensión, con altitudes entre 1300 y 5000 m y pendientes que oscilan entre 35% y 90%; b) una unidad de abanico aluviotorrencial de topografía suave a moderadamente inclinada, situada en la parte media- baja —o terminal— de la cuenca, con elevaciones entre 800 y 1300 m y pendientes entre 5% y 50% (Cuéllar *et al.,* 2014). En el caso específico de la microcuenca La Plata se presentan pendientes escarpadas de hasta 75% (Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima], 2006; Alcaldía de Ibagué, 2013).

La cuenca del río Combeima presenta usos agropecuarios del suelo que abarcan varios cultivos permanentes, en su mayoría cafetales, y una serie de cultivos alternativos (Ospina, 2015). Los sistemas de producción pecuarios corresponden a porcicultura, avicultura y piscicultura, con presencia dispersa de ganado bovino en pequeña escala. Estos sistemas aportan a la generación y vertimiento de contaminantes sobre el recurso hídrico por medio de residuales al aplicar plaguicidas y fertilizantes en el sector agrícola (García *et al.,* 2014).

La calidad del suelo se puede determinar por medio de parámetros químicos, entre los que sobresale el pH, el contenido de materia orgánica (MO), la disponibilidad de nutrientes y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). A pesar de que la MO contenida en el suelo mineral es pequeña, su influencia en las propiedades de los suelos es significativa: incorpora las partículas minerales, aumenta la cantidad de agua que puede retener el suelo, es fuente de nutrientes (N, P, S) y tiene la capacidad de retener iones. El carbono orgánico del suelo (COS) es un indicador de los sistemas intensificados, la calidad de la materia orgánica y la capacidad productiva del suelo (Martínez *et al.,* 2008).

El adecuado crecimiento y producción de plantas se logra controlando factores fisicoquímicos del suelo, como el pH, el contenido de MO y la textura, los cuales pueden hacer que los nutrientes entren en solución o se disminuya su disponibilidad para las plantas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 1993). En los sistemas agrícolas los desórdenes nutricionales que impiden el crecimiento y el rendimiento de las plantas, los cuales se hacen fácilmente visibles cuando su deficiencia es aguda, causan reducciones de la tasa de crecimiento y el rendimiento (Marschner, 2012). En efecto, las deficiencias de nutrientes ocasionan trastornos en las ru-

tas metabólicas de quienes se encuentran implicados y generan consecuencias negativas en otros procesos secundarios (Epstein & Bloom, 2005). La adecuada disponibilidad de nutrientes para las plantas asegurará el éxito de los sistemas de producción.

En este contexto, el objetivo del estudio fue estimar el impacto de los principales sistemas de uso del suelo de la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia) en las propiedades químicas de los suelos. Los resultados permitirán definir cuáles sistemas de uso del suelo son más amigables con el medioambiente, sobre todo en términos de la conservación y mejoramiento del suelo, tomando sus propiedades químicas como indicadores. Los resultados sentarán las bases para el ordenamiento territorial considerando el mejoramiento del recurso suelo.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en la microcuenca La Plata, ubicada en la cuenca media del río Combeima (Tolima, Colombia), la cual ha sido priorizada por Barrios *et al*. (2017) para establecer allí un esquema piloto de incentivo económico en compensación por servicios ecosistémicos. La cuenca del río Combeima se encuentra localizada en el municipio de Ibagué (departamento de Tolima, Colombia), entre las coordenadas 04º 19’ 30” y 04º 39’ 57” N y los 75º 10’ 11” y 75º 23’ 23” O (Pérez & Bosque, 2008) y vierte sus aguas al río Coello, el cual a su vez es tributario del río Magdalena (Figura 19). El área es predominantemente agropecuaria con parches de bosques nativos, principalmente alrededor de cauces y fuentes hídricas.

Figura 19. Ubicación de la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia).

4.2.2. Usos del suelo

Se evaluaron las principales variables químicas de los suelos en los seis sistemas de uso del suelo más importantes del área de estudio: bosque natural (BN), sistema agroforestal con café (SAFC, *Coffea arabica* L.), monocultivos de café (MC), cultivos frutales (CF) de mora (*Rubus glaucus* benth) y granadilla (*Passiflora ligularis f. lobata* (Mast.) Killip), cultivos de fríjol (F. *Phaseolus vulgaris*) y pasturas de corte (P) (Mora *et al.,* 2017). De cada sistema de uso del suelo se seleccionaron cinco repeticiones en fincas de productores, localizadas en la misma ladera, para minimizar el efecto del tipo de suelo y pendiente. En algunos casos todos los sistemas se encontraron en una misma finca, correspondiendo a una repetición. La totalidad de los suelos en los sistemas de uso del suelo analizados presentaron la misma clase textural (ver capítulo 3), lo cual demuestra la homogeneidad de las unidades de muestreo.

4.2.3. Muestreo de suelos

Se recogieron alrededor de diez submuestras de suelo, aleatoriamente seleccionadas en cada una de las unidades de muestreo definidas, para tomar una muestra compuesta. Estas muestras se homogeneizaron, secaron al aire y llevaron al Laboratorio de Suelos Laserex, de la Universidad del Tolima, para su análisis químico. Se estimó el contenido de MO, macro y micronutrientes (Al, B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Zn) y CIC, según los métodos analíticos estandarizados por el mencionado laboratorio (Tabla 6).

Tabla 6
Métodos analíticos utilizados para la determinación de las variables químicas de los suelos bajo sistemas de uso predominante en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia).

Parámetros químicos	Unidad	Método analítico
pH	-	Suspensión ácida. 1:1 Potenciométrico
Materia orgánica (MO)	%	Walkley-Black
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	meq/100 g	NH_4OAC – pH7
Fósforo (P)	ppm	Bray-Kurts II – Espectrofotométrico
Calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K)	meq/100 g	NH_4OAC – Absorción atómica
Hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn)	ppm	Doble ácido – absorción atómica
Boro (B)	ppm	Fosfato monocálcico – Espectrofotométrico
Azufre (S)	ppm	Fosfato monocálcico – Turbidimétrico
Aluminio (Al)	meq/100 g	KCl – Volumétrico

4.2.4. Análisis estadístico

Se empleó un diseño experimental completamente al azar balanceado, con los seis sistemas de uso del suelo como tratamientos y cinco repeticiones. Se probaron los supuestos en que se fundamenta el análisis de varianza (Steel & Torrie, 1988), y en el caso de variables que no seguían la normalidad se procedió a transformaciones de los datos hasta lograrla. Se realizaron análisis de varianza y pruebas de diferencias de pares de medias con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Todas las pruebas y análisis estadísticos se ejecutaron en el programa InfoStat (versión 2015).

4.3. Resultados y discusión

En general, ninguna propiedad química de los suelos fue estadísticamente ($p > 0,05$) afectada por los usos de suelo (Figura 20 y Tablas 7 y 8); sin embargo, se observan algunas ligeras diferencias entre ellos. En cuanto al pH, se detectó que los BN presentaron un pH levemente superior al resto de sistemas (5,9 *vs.* 5,2; Figura 20). Esto indica que la deforestación y el manejo agropecuario están causando acidificación a los suelos, lo cual constituye un grave problema de degradación (Centro de Investigaciones Agronómicas [CIA], 2014). Esta limitante edáfica no solo afecta a Colombia; por ejemplo, se ha establecido que América tiene suelos más ácidos que Asia o África tropical; en nuestro país ese problema se tiene en más del 70% del área (Sánchez & Camacho, 1981).

Cubilla *et al.* (2012) mencionan que la acidez entre 4,51 y 5,4 es baja; de 5,41 a 6,0 es media. A diferencia de los resultados encontrados en este estudio, Fatecha *et al.* (2017) encontraron variaciones de pH de 4,5 a 5,4 en Misiones (Paraguay). Los productores de estas zonas consideran las prácticas de encalado para corregir la acidez producto del material de origen, los procesos de remoción de elementos básicos, los cultivos intensivos y las prácticas de abonamiento. El pH también está influenciado por la MO, debido a los diversos grupos activos ácidos y al contenido de N presente en los residuos orgánicos del suelo (Martínez *et al.*, 2008).

De la misma forma, la MO en los BN de este estudio fue ligeramente superior a los otros usos (Figura 20), lo que indica una mejor calidad de suelos al ser este uno de los indicadores más importantes. El aumento de la MO es inversamente proporcional a la resistencia a la penetración y dependiente del manejo del suelo, relación que constituye un importante indicador de calidad de suelos. La protección de la descomposición acelerada de MO requiere microagregación,

partículas de arcillas y formación de compuestos recalcitrantes para lograr la estabilización entre las propiedades físico-químico-biológicas (Martínez *et al.,* 2008).

La CIC siguió la misma tendencia que el pH y la MO, ya que fue menor en los SAFC y MC y mayor en el BN (18,2 ± 0,4 y 18,2 ± 0,5 *vs.* 21,4 ± 0,9 meq/100 g, respectivamente) (Figura 20). La baja CIC puede afectar la disponibilidad de los nutrientes, al estar determinada por el contenido de arcillas (capítulo 3) y la MO. Los cationes de mayor importancia con relación al crecimiento de las plantas son $Ca^{2+,}$ Mg^{2+}, K^{+}, NH^{4+} y el efecto en la disponibilidad de los nutrientes y la humedad está dado por Na^{+} y H^{+} (Chávez, 2015). Zúñiga *et al.* (2016) encontraron que en suelos de Ecuador las variaciones de 4,9 a 18,9 meq/100 g en la CIC fueron atribuidas a la adición de fertilizantes y a las bajas temperaturas, que causan una menor liberación de las bases.

De los macronutrientes analizados, el P se encontró en mayor concentración en el SAFC (39,8 ± 5,9 mg/kg), el Ca en el BN (5,6 ± 0,2 meq/100 g), el Mg y el S en MC (2,8 ± 0,3 meq/100 g y 62,2 ± 10,1 mg/kg, respectivamente) y el K en el F (0,7 ± 0,1 meq/100 g) (Tabla 7). Los rangos de clasificación en que se basaron Fatecha *et al.* (2017) muestran que valores > 0,38 meq/100 g son muy altos para K, valor superado por todos los sistemas de uso del suelo estudiados. Al ser asimilado por las plantas, este nutriente mejora su régimen hídrico y aumenta la tolerancia a sequías, heladas y salinidad, con probabilidad de sufrir menores enfermedades (Cubilla *et al.,* 2012). De la misma manera, el P es mayor a 24 mg/kg en todos los sistemas de uso evaluados (Tabla 7). Este elemento es esencial para la fotosíntesis y otros procesos bioquímicos como la diferenciación celular y el desarrollo de tejidos que permiten el crecimiento óptimo de las plantas (Cubilla *et al.,* 2012).

Asimismo, se encontró que la relación Ca/Mg presenta el mayor valor en BN y en el F (2,3 ± 0,3 y 2,3 ± 0,2, respectivamente); mientras que los SAFC presentaron la mayor relación (Ca + Mg)/K y de Mg/K (28,2 ± 7,8 y 9,4 ± 2,2, respectivamente) (Tablas 7 y 8). No se evidenció desequilibrio entre los cationes, es decir, la relación Mg/K fue superior a 2,5 y la relación (Ca + Mg)/K fue superior a 10, lo cual indica la no escasez de las bases Ca y Mg respecto a K, y por ende, no hay dificultad de absorción para las plantas, aunque el suelo con F presentó el valor más cercano a 10 (14,1 ± 3,7). Cuando se encuentran valores menores a 25, 40 y 15 para las relaciones Ca/K, (Ca + Mg)/K y Mg/K, respectivamente, hay disponibilidad de K respecto a Ca, Mg o ambos, o sea que la absorción de K por la planta no presenta dificultades (Bertsch, 1987). Este mismo autor afirma que las proporciones equilibradas de los cationes (Ca, Mg, K), ofrecen la posibilidad de ser absorbidos por la planta, a diferencia de si están en desequilibrio.

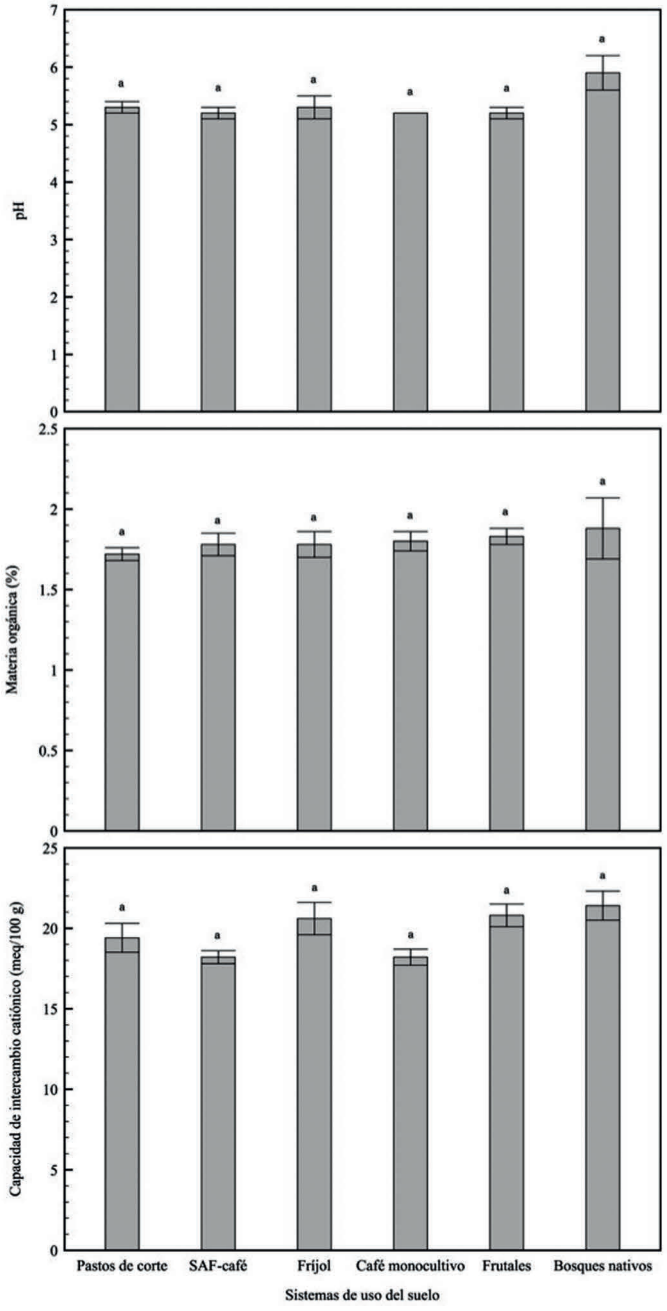

Figura 20. Principales características químicas de suelos bajo los usos del suelo dominantes en la microcuenca La Plata (Ibagué, Colombia). Los valores corresponden a media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticas entre sistemas de uso del suelo (p < 0,05).

En particular, Valencia (1986) evidencia que el rango adecuado de las bases para el cultivo del café son: K desde 0,35 meq/100 g, Ca de 2,1 a 4,2 meq/100 g y Mg de más de 0,7 meq/100 g. Los suelos de estos sistemas de uso resultaron con valores superiores, indicando rangos adecuados, aunque son similares al reportado en el municipio de Neira (Caldas). Estas relaciones indican equilibrio en la disponibilidad de estas bases, lo que es congruente con la baja acidez, la baja saturación de aluminio y la concentración alta de las bases. Estas variables son indicadoras de suelos de alta fertilidad en la zona.

El Fe y el Mn se encontraron en menor concentración en P y en mayor nivel en los BN (Tabla 7). Contrastando, el Cu fue mayor en los P y menor en BN y F. El Na fue muy similar en todos los sistemas, exceptuando los CF, donde su valor se incrementó levemente (0,2 *vs.* 0,3 meq/100 g; Tabla 7). Por su parte, el Zn y el B se encontraron en mayor concentración en el sistema de MC (4,3 ± 0,4 y 0,7 ± 0,1 mg/kg, respectivamente; Tabla 7).

Según el análisis de Méndez y Bertsch (2012) realizado en Costa Rica, en la presente investigación las P y MC presentaron un nivel crítico de Fe (< 10 mg/kg), a diferencia de los demás sistemas, que presentaron un nivel medio (10-100 mg/kg). Respecto al Mn, todos los SUS están en la categoría media (5-50 mg/kg). Contrastando, el Cu se registró en el nivel crítico (< 2 mg/kg). El Zn en todos los SUS se clasificó en categoría media (2-10 mg/kg). Por último, Molina y Meléndez (2002) mencionan que el rango óptimo de B es entre 0,5-1 mg/kg, valores registrados en este estudio. No obstante, el diagnóstico de los micronutrientes del suelo con base en los rangos establecidos puede traer repercusiones al analizar los resultados; adicionalmente, las plantas tienen diferentes requerimientos nutricionales y hábitos de crecimiento (Molina & Meléndez, 2002).

La saturación de Al, también llamada saturación de acidez intercambiable, fue mayor a 1% en todos los sistemas, siendo el mayor valor en el F (3,2 ± 1,0%). La tolerancia de acidez varía según el cultivo o la variedad; en general, ningún cultivo soporta más del 60% de saturación y la mayoría de las plantas se establecen entre 10-25% (Molina, 1998). Pero, en el F una saturación mayor de 10% causa severas pérdidas en producción (Salinas, 1990), debido a que el Al tiende a acumularse en las raíces, impidiendo la absorción y el traslado de nutrientes a la parte aérea. En cultivos de café el Al es neutralizado cuando el pH es mayor a 5,5, aunque el rango adecuado para este cultivo se encuentra entre 5,0 y 5,5 de acidez. La mayor saturación de bases fue alcanzada en SAFC (47,0 ± 2,5%; Tabla 7). Al presentarse las características ideales para cada cultivo se mantiene la fertilidad del suelo y la eficiencia de la fertilización, pues entre menos ácido sea el suelo mayor es la capacidad de retención o almacenamiento, mayor crecimiento radicular, menor intercambio de Al, mayor

capacidad de las bases intercambiables y menos susceptibilidad de pérdida con la escorrentía (Centro Nacional de Investigaciones del Café [Cenicafé], 2016).

El contenido de nutrientes del suelo determina en gran medida su potencial para nutrir los cultivos que se desarrollarán y la reducción de la severidad de las enfermedades (Fixen, 1993; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2013). Sin embargo, según Brissio (2005) la asimilación de nutrientes está influenciada por el pH, ya que algunos nutrientes se pueden bloquear en determinadas condiciones del mismo y no ser asimilable para las plantas. La fertilidad está definida en especial por la saturación de bases en el suelo, si es menor al 100% un aumento en el pH incrementa las concentraciones de Ca y Mg (Oliva, 2009). Además, la CIC en este estudio se mantuvo dentro del intervalo normal (12-25 meq/100 g) al igual que el pH (5,2-6,0) para suelos en la región Andina, lo cual facilita la disponibilidad y aprovechamiento de los nutrientes por las plantas (Rodríguez & Restrepo, 2016). Esto puede indicar que el manejo del suelo no ha sido en detrimento de su calidad.

La FAO (2016) enumera las diez amenazas que se deben combatir en el mundo respecto al manejo del suelo: erosión, pérdida del COS, desequilibrio de nutrientes, acidificación, contaminación, anegamiento, compactación, sellado, salinización y pérdida de la biodiversidad. Algunas de las alternativas que se han planteado para mejorar la calidad del suelo son: reciclar apropiadamente los desechos producidos por el hombre y seleccionar aquellos que estimulan la fertilidad y reducen la escorrentía y la erosión (Organización Mundial de la Salus [OMS], 2005). En la actualidad se dispone de un amplio número de tecnologías de reparación de suelos contaminados (Abouhamad *et al.,* 2017). Ortiz *et al*. (2007) recomiendan técnicas de contención, confinamiento y descontaminación que mediante procesos químicos, físicos y biológicos alteran la estructura para su recuperación.

Otra estrategia ampliamente recomendada por varios autores es mantener un sistema agrícola lo más parecido a un bosque natural, en su estructura de cubierta, densidad arbórea y cubierta vegetal, lo cual reduce la posibilidad de que el suelo se erosione (Ruiz & Aide, 2005; Duval *et al.,* 2017; FAO, 2017). De la misma forma, la FAO (2017) asegura que el pastoreo rotativo o racional puede evitar la degradación del suelo o promover su restauración. Además, se debe complementar con otras medidas como el desarrollo de la práctica de conservación, buenas prácticas agrícolas, gestión del riesgo y gestión integrada de los nutrientes de las plantas. Miao *et al.* (2017) concluyen que el barbecho natural, como práctica de manejo, mejora la estabilidad estructural del suelo, tanto de macroagregados como de microagregados. Dicha práctica proviene del sistema agrícola indígena, caracterizado por largos períodos de descanso después de un corto tiempo de cultivo, de 1-3 años (Freitas *et al.,* 2017).

Tabla 7
Contenido de macronutrientes de los suelos, a una profundidad de 0 a 30 cm, en sistemas de uso del suelo predominantes en la microcuenca La Plata, municipio de Ibagué (Colombia), 2017.

Sistemas de uso del suelo	P	S	Ca	Mg	K	Ca/Mg	(Ca + Mg)/K	Mg/K
	mg/kg		meq/100 g					
Pastura de corte	31,6 ± 4,8 a	44,6 ± 9,7 a	5,1 ± 0,1 a	3,0 ± 0,2 a	0,5 ± 0,1 a	1,8 ± 0,1 a	18,0 ± 3,8 a	6,6 ± 1,5 a
Café	39,4 ± 6,7 a	62,2 ± 10,1 a	5,0 ± 0,1 a	2,7 ± 0,2 a	0,6 ± 0,1 a	1,9 ± 0,1 a	17,5 ± 5,1 a	6,2 ± 2,0 a
SAF-café	39,8 ± 5,9 a	53,6 ± 6,5 a	5,1 ± 0,1 a	2,8 ± 0,3 a	0,4 ± 0,2 a	1,9 ± 0,2 a	28,2 ± 7,8 a	9,4 ± 2,2 a
FrÍjol	39,0 ± 5,7 a	40,6 ± 8,6 a	5,1 ± 0,1 a	2,3 ± 0,2 a	0,7 ± 0,1 a	2,3 ± 0,2 a	14,1 ± 3,7 a	4,1 ± 0,9 a
Bosque	37,6 ± 9,0 a	53,6 ± 5,3 a	5,6 ± 0,2 a	2,5 ± 0,2 a	0,5 ± 0,0 a	2,3 ± 0,3 a	18,5 ± 2,4 a	5,7 ± 0,8 a
Frutales	35,2 ± 8,2 a	45,0 ± 6,7 a	5,2 ± 0,1 a	2,7 ± 0,2 a	0,6 ± 0,1 a	2,0 ± 0,1 a	16,4 ± 4,1 a	5,8 ± 1,6 a

SAF: sistemas agroforestales. P: Fósforo, S: Azufre, Ca: Calcio, Mg: Magnesio, K: Potasio. Valores corresponden a medias ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre sistemas de uso del suelo según la prueba de Tukey.

Tabla 8
Contenido de micronutrientes de los suelos, a una profundidad de 0 a 30 cm, en sistemas de uso del suelo predominantes en la microcuenca La Plata, municipio de Ibagué (Colombia), 2017.

Sistema de uso del suelo	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Na	Al	Saturación de Al	Saturación de bases
	mg/kg				meq/100 g			%	
Pastura de corte	6,9 ± 1,1 a	11,6 ± 2,7 a	1,1 ± 0,2 a	3,6 ± 0,3 a	0,6 ± 0,1 a	0,2 ± 0,0 a	0,2 ± 0,1 a	2,6 ± 1,0 a	45,8 ± 1,8 a
café	9,0 ± 1,7 a	15,3 ± 3,3 a	1,0 ± 0,2 a	4,3 ± 0,4 a	0,7 ± 0,1 a	0,2 ± 0,0 a	0,3 ± 0,0 a	3,0 ± 0,3 a	46,7 ± 2,8 a
SAF-café	10,6 ± 2,0 a	9,1 ± 2,2 a	0,9 ± 0,1 a	3,1 ± 0,6 a	0,6 ± 0,1 a	0,2 ± 0,0 a	0,3 ± 0,1 a	4,0 ± 1,8 a	47,0 ± 2,5 a
Frutales	11,8 ± 1,4 a	08,8 ± 1,5 a	0,8 ± 0,1 a	3,4 ± 0,5 a	0,6 ± 0,1 a	0,3 ± 0,0 a	0,3 ± 0,0 a	3,1 ± 0,5 a	42,3 ± 1,7 a
Fríjol	12,6 ± 4,6 a	12,9 ± 2,7 a	0,7 ± 0,1 a	2,9 ± 0,2 a	0,5 ± 0,0 a	0,2 ± 0,0 a	0,3 ± 0,1 a	3,2 ± 1,0 a	40,7 ± 3,8 a
Bosque	24,6 ± 9,1 a	18,8 ± 3,4 a	0,7 ± 0,1 a	3,9 ± 0,6 a	0,5 ± 0,0 a	0,2 ± 0,0 a	0,1 ± 0,1 a	1,2 ± 1,2 a	41,1 ± 1,8 a

SAF: sistemas agroforestales. Fe: Hierro, Mn: Manganeso, Cu: Cobre, Zn: Zinc, B: Boro, Na: Sodio, Al: Aluminio. Valores corresponden a medias ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre sistemas de uso del suelo según la prueba de Tukey.

4.4. Conclusiones

Las propiedades químicas evaluadas de los suelos no fueron afectadas por los sistemas de uso del suelo predominantes de la quebrada La Plata. Variables como el pH, materia orgánica, K y P, evidencian buenas condiciones con base en los requerimientos nutricionales de los principales sistemas de uso del suelo en la zona.

Aunque no se detectó un efecto del uso del suelo en la capa superficial, los resultados muestran un proceso de acidificación del suelo por efecto de la deforestación, al convertir bosques a usos agropecuarios. De la misma forma, este proceso ha causado reducciones de la materia orgánica del suelo, factor esencial para la fertilidad y vida de este insumo productivo.

Tener claridad sobre el impacto de los principales sistemas de uso del suelo en las propiedades químicas de él es de suma importancia para definir en cuál de estos sistemas las plantas tendrán mayor crecimiento y una mejor productividad de los cultivos. Esta característica define, en gran medida, las posibilidades de éxito de los sistemas de uso del suelo. Los resultados evidencian que los suelos de la microcuenca La Plata, ubicada en la cuenca del río Combeima, favorecen la disponibilidad y el aprovechamiento de los nutrientes para las plantas, de modo que potencian el éxito de los cultivos.

4.5. Agradecimientos

Los autores agradecen a los habitantes de la cuenca media del río Combeima por permitir el ingreso y la toma de muestras en sus predios; a la Oficina Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima por la financiación del proyecto de alianza de grupos con código 290113 y los integrantes de los grupos de investigación aliados a este proyecto.

4.6. Referencias

Abouhamad, S. L., Rojas, M. V., Méndez, J. L., Salazar, K., y Salmerón, A. L. (2017). Servicios ecosistémicos de regulación que benefician a la sociedad y su relación con la restauración ecológica. *Biocenosis, 31*(1-2).

Alcaldía de Ibagué (2013). *Estructura ecológica principal municipal*. Recuperado de https://issuu.com/elnuevodia/docs/documento_estructura_ecologica_prin

Alvarado, J., Andrade, H. J., y Segura, M. A. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea ara-*

bica l.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, *16*(1), 20-31.

Andrade, H. J., Segura, M. A., y Rojas, A. S. (2016). Carbono orgánico del suelo en bosques riparios, arrozales y pasturas en Piedras, Tolima, Colombia. *Agronomía Mesoamericana, 27*(2), 233-241.

Barrios, M., Losada, S., Guío, A. J., y Muñoz, J. (2017). Priorización de sitio para aplicar un incentivo económico de compensación por servicios ecosistémicos en la cuenca alta del río Combeima. En Muñoz, J. y Guio, A. (Eds.), *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia)* (pp. 101-159). Ibagué: Universidad del Tolima.

Bertsch, F. (1987). *Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica*. San José: Editorial Universidad de Costa Rica.

Brissio, P. A. (2005). *Evaluación preliminar del estado de contaminación en suelos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarburífera*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Comahue**.**

Centro de Investigaciones Agronómicas [CIA] (2014). Acidez de suelos y uso de enmiendas. *Serie técnica 1*: 1-7. Universidad de Costa Rica.

Centro Nacional de Investigaciones del Café [Cenicafé] (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. Gerencia Técnica / Programa de Investigación Científica. *Fondo Nacional del Café*, 466, 1-12. Manizales, Colombia.

Chávez, A. R. (2015). *Comparación de dos métodos de determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos de la región central de Honduras* (Trabajo de grado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima] (2006). Fisiografía y suelos. En *Plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas: Pomca* (pp. 134-178). Ibagué: Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima].

Cubilla, M. M., Wendling, A., Eltz, F. L., Amado, T. J. C., Milelniczuk, J. (2012). *Recomendaciones de fertilización para soja, trigo, maíz y girasol bajo el sistema de siembra directa en el Paraguay*. Asunción: Capeco.

Cuéllar, M. A., López, J. A., Carrillo, E. J., Ibáñez, D. G., Sandoval, J. H., y Osorio, J. A. (2014). Control de la actividad tectónica sobre los procesos

de erosión remontante: el caso de la cuenca del río Combeima, cordillera Central, Colombia. *Boletín de Geología, 36*(1), 37-56.

Duval, M. E., Galantini, J. A., Capurro, J. E., y Beltrán, M. J. (2017). Producción y calidad de diferentes cultivos de cobertura en monocultivo de soja. *Ciencias Agronómicas, XXIX*, 07-13.

Epstein, E., y Bloom, A. (2005). Mineral nutrition of plants: principles and perspectives (2.a ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates Publishers.

Espinosa, M., Andrade, E., Rivera, P., Romero, A. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de geografía*, (53-54), 77-88.

Fatecha, D. A., William, R., Sebem, E., Samaniego, L. R., Hahn, E. O., y Rasche, J. W. (2017). Clasificación de parámetros químicos de suelos agrícolas de los departamentos de Misiones, Itapúa y Alto Paraná. *Tecnol. Agrar, 2*(1), 8-13.

Fixen, P. E. (1993). Crop responses to chloride. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy*. San Diego, CA: Academic Press.

Freitas, V., Góis, A., Vargas, A. C., y Alves, S. (2017). Land use and changes in soil morphology and physical-chemical properties in southern Amazon. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *41*, 1-14.

García, G., Gordillo, J., Tovar, K., y Ospina, O. (2014). *Modelo MECA - Evaluación de cargas contaminantes en la cuenca alta del río Combeima* (Trabajo de grado). Universidad Cooperativa de Colombia, Ibagué, Colombia.

Hernández, Y. (2013). *Caracterización y análisis de la amenaza y vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca de la quebrada Cay, Ibagué, departamento del Tolima* (Tesis de Maestría en Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas). Ibagué: Universidad del Tolima.

Houghton, R. A., Hackler, J. L., y Lawrence, K. T. (1999). The U.S. carbon budget: contribution from land-use change. *Science*, *285*, 574-578.

Lambin, E, F., Turner, B. L., Geista, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W.,... Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental change, 11*(4), 261-269.

Marschner, P. (Ed.) (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3.a ed.). Londres: Academic Press.

Martínez, E., Fuentes, J. P., Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal, 8*(1), 68-96.

Méndez, J. C., y Bertsch, F. (2012). *El uso de bases de datos en el estudio de la fertilidad de los suelos agrícolas de Costa Rica: estado actual y principales cambios en el tiempo*. San José: Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas.

Miao, S., Qiao, Y., Li, P., Han, X., y Tang, C. (2017). Fallow associated with autumn-plough favors structure stability and storage of soil organic carbon compared to continuous maize cropping in Mollisols. *Plant and Soil*, *416*(1-2), 27-38.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente] (2016). *Política para la gestión sostenible del suelo*. Bogotá: Grupo de Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental – Centro de documentación.

Molina, E. (1998). Acidez de suelo y encalado. En *Encalado para la corrección de acidez del suelo*. San José, Costa Rica: ACCS.

Molina, E., y Meléndez, G. (2002). Tabla de interpretación de análisis de suelos. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, mimeo.

Mora, J., Rodríguez, P., Guío, A. J., y Muñoz, J. (2017). Caracterización socioeconómica de la comunidad de la cuenca alta del río Combeima. En *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia)* (pp. 67-96). Ibagué: Universidad del Tolima.

Oliva, D. P. (2009). *Determinación de la acidez intercambiable (Al+3+H+) a partir del pH para la estimación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua* (Trabajo de grado). Tegucigalpa, Honduras.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (1993). *Erosión de suelos en América Latina*. Roma. Recuperado de http://www.fao. org/docrep/t2351s/T2351S00.htm#Contents

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2013). Manual de compostaje para el agricultor. Recuperado de http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2016). Estado mundial del recurso suelo. Resumen técnico. Roma. Recuperado de http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2017). Servicios ecosistémicos y biodiversidad. Recuperado de

http://www.fao.org/ ecosystem-services-biodiversity/background/regulatingservices/es/

Organización Mundial de la Salud [OMS] (2005). *Ecosistemas y bienestar humano: s*íntesis sobre salud. Un informe de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EM) / Equipo de autores principales: Carlos Corvalán, Simon Hales y Anthony McMichael; equipo extendido de autores: Colin Butler *et al*.; revisores: José Sarukhá *et al*.

Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M., y Villar, S. (2007). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de vigilancia tecnológica*. Recuperado de https://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt6_ tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf

Ospina, O. E. (2015). Análisis de la contaminación microbiológica en el río Combeima, municipio de Ibagué (Tolima, Colombia). *Producción + Limpia, 10*(2), 92-103.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC] (2005). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono.* Editores: B. Metz, O. Davidson, H. Conink, M. Loos y L. Meyer, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Rodríguez, L., y Restrepo, J. C. (2016). *Evaluación de algunas características fisicoquímicas del suelo y microclima de un bosque secundario para su futura adecuación en sistema silvopastoril.* Pereira, Colombia.

Ruiz, M. C., y Aide, T. M. (2005). Vegetation structure, species diversity, and ecosystem processes as measures of restoration success. *Forest Ecology and Management, 218*, 159-173.

Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R.,… Wall, D. H. (2000). Biodiversity: global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, *287*, 1770-1774.

Salinas, J. (1990). *Sorgo para suelos ácidos. Suelos tropicales; relaciones suelo-planta; mejoramiento y selección*. CIAT.

Sánchez, P., y Camacho, E. (1981). *Suelos del trópico: características y manejo*. IICA Biblioteca Venezuela.

Segura, M. A., y Andrade, H. J. (2017). Valoración financiera del servicio ecosistémico y regulación hídrica en la cuenca alta del río Combeima. En *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia)* (pp. 163-173). Ibagué: Universidad del Tolima.

Steel, R., y Torrie, J. (1988). *Bioestadística: principios y procedimientos*. México: McGraw-Hill.

Tolba, M. K., y El-Kholy, O. A. (1992). *The World Environment 1972-1992: Two Decades of Challenge*. Londres: Chapman & Hall on behalf of the United Nations Environment Programme.

Valencia, G. (1986). *Interpretación de análisis de suelos para café*. Recuperado de http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/717/7/7%20Interpretaci%C3%B3n%20an%C3%A1lisis%20suelos%20caf%C3%A9.pdf

Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., y Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science, 277*(5325), 494-499.

Zúñiga, F., Buenaño, M., y Risco, D. (2016). Caracterización física y química de suelos de origen volcánico con actividad agrícola, próximos al volcán Tungurahua. *Revista Ecuatoriana de Investigaciones Agropecuarias, 1*(1), 5-10.

Sección III

Aptitud de uso de la tierra e impactos ambientales de los sistemas de producción

5

Impacto ambiental de los sistemas de uso del suelo en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia)

Luz Estela Barreto Sanchez[1,2]; Daniel Enrique Guauque Mellado[1,2];
Antonio José Guío Duque[1,3]*; Jader Muñoz Ramos[1,3]

Resumen

La cuenca del río Combeima aporta, entre otros servicios ambientales, alrededor del 80% de agua para el acueducto de la ciudad de Ibagué (Tolima). Dentro de esta unidad geográfica hay un avance del mosaico de cultivos de 10,1 ha/año y no se cuenta con estudios que cuantifiquen los impactos generados por los sistemas de producción, hecho que limita la planificación y aprovechamiento sostenible del territorio. Por esta razón se planteó un estudio con el objetivo de evaluar el impacto ambiental de los sistemas de uso del suelo (LUS, por sus siglas en inglés) en esta cuenca. Se identificaron y caracterizaron los LUS mediante un diagnóstico rural participativo, seguido de una caracterización biofísica y socioeconómica. Para la evaluación del impacto ambiental se determinaron los efectos ambientales, la importancia relativa (IR) y el impacto global (IG) de las actividades desarrolladas en los LUS, y se culminó con la formulación de un plan de manejo ambiental (PMA). Se encontró que los LUS predominantes son de tipo permanente. Las actividades con mayor IR fueron: preparación del terreno y control fitosanitario. Se identificaron impactos negativos en los sistemas abiótico (agua y suelo), biótico (flora) y socioeconómico (recolección de basuras y salud), e impactos positivos en empleo y subsistencia económica. El IG del escenario inicial fue de -0,60 (severo) y el de los LUS fue de -0,25 (moderado), con lo cual se obtuvo un IG neto de 0,35 (moderadamente positivo). Lo anterior permite concluir que, aunque los LUS producen impactos negativos sobre algunos elementos del ambiente, estos son moderados, lo cual hace pensar que es factible la recuperación ambiental de la cuenca.

Palabras clave: ambiente, gestión ambiental, impacto ambiental global, sistemas productivos.

1 Grupo de Investigación "Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales" (Proecut), Universidad del Tolima.
2 Estudiante en la Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.
3 Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.
* Autor para correspondencia, correo electrónico: aguio@ut.edu.co

Abstract

The Combeima river basin contributes, among other environmental services, about 80% of water for the aqueduct of the city of Ibagué (Tolima). Within this geographical unit there is a progress of the crop mosaic of 10.1 ha/year and there are no studies that quantify the impacts generated by the production systems, a fact that limits the planning and sustainable use of the territory. For this reason, a study was proposed with the objective of evaluating the environmental impact of the Land Use Systems (LUS) in this basin. LUS was identified and characterized by a Participatory Rural Diagnosis, followed by a biophysical and socio-economic characterization. For the environmental impact assessment, the environmental effects, the Relative Importance (IR) and the Global Impact (GI) of the activities developed in the LUS were determined, and culminated in the formulation of an Environmental Management Plan (EAP). It was found that the predominant LUS are of the permanent type. The activities with higher IR were: land preparation and phytosanitary control. Negative impacts were identified in the abiotic (water and soil), biotic (flora) and socioeconomic (garbage collection and health) systems, and positive impacts on employment and economic subsistence. The GI of the initial scenario was -0.60 (severe) and that of the LUS was -0.25 (moderate), resulting in an IG neto of 0.35 (moderately positive). The above allows to conclude that, although the LUS has negative impacts on some elements of the environment, these are moderate, which suggests that the environmental recovery of the basin is feasible.

Keywords: environment, environmental management, global environmental impact, productive systems.

5.1. Introducción

La cuenca del río Combeima tiene gran importancia como paisaje estratégico para el desarrollo territorial de Ibagué (Tolima, Colombia), debido a que aporta, entre otros servicios ambientales, el 80% del suministro de agua que abastece al acueducto de la ciudad (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2009). Además, esta cuenca posee ecosistemas de gran diversidad biológica y paisajística, cada vez más susceptibles de ser deteriorados por el establecimiento de agroecosistemas con prácticas inadecuadas (Linares, 2015), que ocasionan disminución importante de la cobertura boscosa —cerca de 1300 ha en los últimos treinta años— y el deterioro del suelo. Este hecho provoca erosión alta (alrededor de 2,3 t/ha/año de material inerte en suspensión) y sedimentación, e incide negativamente en la capacidad de regulación hídrica (Muñoz *et al.,* 2014).

Existen herramientas jurídico-técnico-administrativas para identificar, predecir, evaluar, cuantificar y priorizar los impactos generados al medioambiente en desarrollo de los sistemas agroproductivos (Espinoza, 2001). Entre estas herramientas se tiene la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), que en su objetivo fundamental busca proveer recomendaciones que aseguren la conservación de los recursos naturales y aportar elementos para garantizar un desarrollo compatible entre las actividades del hombre y el medioambiente (Sanz, 1991).

Son reconocidos los impactos ocasionados por los sistemas de producción agropecuaria y los diversos métodos de evaluación en el mundo (Mazzucchelli & Sánchez, 1999; Molina, 2002; Salomone, 2003; Rodríguez, 2008; Díaz, 2010; Pinos *et al.,* 2012). Las prácticas inadecuadas que se realizan en estos sistemas se traducen progresivamente en degradación de las propiedades fisicoquímicas e hidrológicas de los suelos, contaminación de las fuentes hídricas y el aumento de residuos de pesticidas, fertilizantes y residuos sólidos, lo cual genera cambios en el ambiente y degradan el capital natural (Oesterheld, 2008). Dichos cambios aumentan los costos de producción, reducen la rentabilidad de los sistemas productivos y tornan insostenible la calidad de vida de los habitantes (Universidad del Tolima, 2003). En el caso de Colombia, son pocos los estudios que se han realizado (Borrás *et al.,* 2000; Chiquito & Zuluaga, 2007) y no existen métodos oficiales de EIA, dejando en el evaluador la selección del más adecuado (Calderón *et al.,* 2013). No obstante, Gómez (2003) y Muñoz (2007) diseñaron metodologías enfocadas en evaluar la importancia unitaria y relativa, así como el impacto global de las actividades llevadas a cabo en dichos sistemas.

En este trabajo se evaluó el impacto socioeconómico-ambiental de los principales sistemas de uso del suelo en zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia) y se formulan estrategias que permitan una gestión apropiada de los recursos, con el fin de contribuir a la sostenibilidad en la oferta de bienes y servicios ambientales de esta importante unidad geográfica.

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Área de estudio

La cuenca del río Combeima (Figura 21) se encuentra ubicada en el departamento del Tolima, entre los 4º 19’ 30” y 4º 39’ 57” N y los 75º 10’ 11” y 75º 23’ 23” O, sobre el flanco oriental de la cordillera Central de los Andes colombianos, con una extensión aproximada de 27 422 ha. Esta cuenca presenta variaciones altitudinales que van desde los 700 hasta los 5215 m, una precipitación bimodal con media anual de 1800 mm y temperatura media anual de 14 ºC, aproximadamente (Pérez & Bosque, 2008).

A lo largo de sus divisorias de aguas se hallan seis caseríos de amplia extensión rural y, en forma parcial, la ciudad de Ibagué. En las zonas de ladera, sobre los 2600 m de altitud, se registra la actividad agropecuaria de mayor importancia, ya que estas zonas son propicias para el establecimiento de diversos arreglos productivos (Muñoz *et al.*, 2014). La presente investigación se desarrolló en estas zonas de laderas, en las veredas El Retiro-El Resbalón y La Plata-El Brillante, del corregimiento 8.

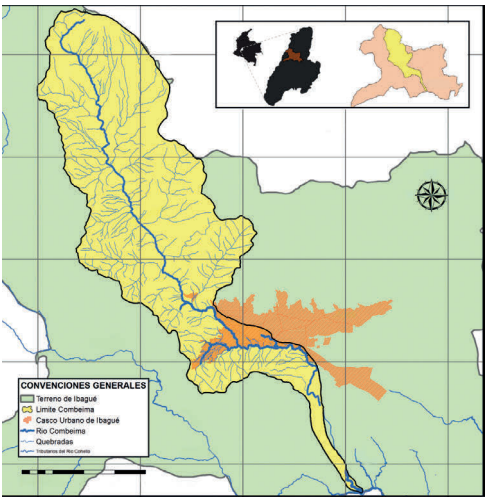

Figura 21. Localización general de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia).

5.2.2. Estudio de la oferta ambiental del territorio

La caracterización de la oferta ambiental se desarrolló conforme a lo estipulado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT] (2010), el cual señala las orientaciones metodológicas para la caracterización de los sistemas abiótico, biótico y socioeconómico. Se tomaron fuentes de información secundaria como Losada y Carvajal (2005), la Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima] (2009), la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica] (2009), Geotec (2012), Muñoz *et al.* (2014), y del capítulo 1 de este libro.

5.2.3. Estudio de la demanda ambiental de los sistemas de uso del suelo

Como se relaciona en el capítulo 2, los principales sistemas de uso del suelo en laderas de la cuenca del río Combeima son: café (*Coffea arabica* L.), mora (*Rubus glucus* Benth), granadilla (*Passiflora ligularis*), pasturas, maíz (*Zea mays*),

plátano (*Musa* AAB), fríjol (*Phaseolus vulgaris*) y yuca (*Manihot esculenta*). Algunos de estos sistemas, como el café y el plátano, se encuentran en diferentes sistemas agroforestales. Se realizó un análisis multivariado de conglomerados sustentado en las siete etapas productivas de los cultivos, y la extensión y frecuencia de estos en la microcuenca, agrupando los sistemas permanentes.

5.2.4. Evaluación del impacto ambiental

La identificación, cuantificación y análisis de los impactos ambientales se efectuó mediante diferentes procedimientos de estudio de las interacciones actividades-medio, los cuales se incorporaron de manera sistémica.

- *Matriz de chequeo de efectos ambientales:* las acciones de cada una de las etapas de producción y los elementos del ambiente que afectaron fueron organizadas en forma matricial, con el fin de identificar el carácter de las interacciones. Las interacciones se marcaron con color rojo cuando el carácter era negativo (disminución, desmejora o pérdida de calidad ambiental) y verde si era positivo (aumento, mejora o ganancia de calidad ambiental). Al finalizar, se relacionaron las interacciones en cada nivel del ambiente y del proyecto.
- *Importancia unitaria de los impactos:* luego del chequeo de las interacciones entorno-proyecto se calculó la importancia unitaria (IU) del impacto según la metodología de Gómez-Orea (1988), mediante la expresión:

$$IU = (Signo)\ 3\ (In) + 2\ (Ext) + Mo + P + R$$

donde:

IU	:	Importancia unitaria de impactos.
Signo	:	(+/-)
In	:	Intensidad.
Ext	:	Extensión.
Mo	:	Momento.
P	:	Persistencia.
R	:	Reversibilidad.

En concordancia con Rodríguez (2009), se distribuyeron las IU de los impactos en intervalos con la finalidad de jerarquizarlas según el nivel de importancia, tanto para impactos positivos como negativos (Tabla 9), al igual que estimar la proporción de los efectos y de las actividades.

Tabla 9
Escala calificativa del nivel de importancia de los impactos ambientales (positivos- negativos).

Intervalo de IU	Nivel de importancia	
	Impactos positivos	Impactos negativos
08-11	Bajo	Irrelevante
11-14	Medianamente bajo	Moderado
14-17	Medianamente alto	Relevante
17-20	Alto	Severo
20-23	Muy alto	Crítico

Fuente: modificado de Rodríguez (2009).

- *Importancia relativa:* debido a que los diversos componentes del ambiente tienen menor o mayor importancia ecosistémica y fragilidad dentro del sistema cuenca, se procedió a ponderar las IU. Empleando el método Delphi (Helmer, 1966; Listone & Tureff, 1975) se distribuyeron relativamente 1000 unidades de ponderación (IP) entre el total de componentes ambientales, según:
  i) La importancia ecológica, económica y cultural de los factores y componentes ambientales.
  ii) La resiliencia, vulnerabilidad, amenaza y riesgo de los factores ambientales involucrados en los procesos productivos de los sistemas.

La transformación de las IU a valores de importancia relativa (IR) del impacto producido en el *j*-ésimo componente ambiental se realizó por medio de la siguiente expresión (Muñoz, 2007):

$$IR_j = \frac{TOT_j * IP_j}{\sum_{j=1}^{k} IP_j}$$

donde:
IRj : Importancia relativa del *j*-ésimo componente ambiental.
TOTj : Suma algebraica de las importancias de los impactos sobre el *j*-ésimo componente ambiental.
IPj : Índice de ponderación del *j*-ésimo componente ambiental.
k : Número de componentes ambientales en estudio.

- *Impacto global:* el impacto global (IG) del proyecto se estimó comparando el escenario con sistemas productivos o "con proyecto" contra el escenario inicial o "sin proyecto". La línea de base o escenario inicial fue definido mediante la caracterización del estado ambiental de

la zona de estudio antes de implementarse los sistemas de producción estudiados, que se realizó a través de revisión de documentos históricos de la zona.

El IG fue calculado mediante la expresión (Muñoz, 2007):

$$IG = \frac{\sum_{j=1}^{k}(IF_j * \sum_{i=1}^{n} |I_i|)}{25 * n * \sum_{j=1}^{k} IF_j}$$

donde:

IG : Impacto global.
∑|Ii| : Sumatoria de los valores absolutos de las importancias calculadas por componente ambiental.
IFj : Índice de ponderación del *j*-ésimo componente ambiental.
n : Número de actividades del proyecto.
k : Número de componentes ambientales en estudio.
25 : Máximo valor absoluto de la IU.

La valoración de la IG se hizo conforme la escala presentada en la Tabla 10. El signo de este indicador fue dado por la naturaleza positiva o negativa de las actividades ejercidas en los escenarios con y sin proyecto (sistemas de producción).

Tabla 10
Escala calificativa del impacto global e impacto global neto.

Valor (IG)	Calificativo
< 0,25	Irrelevante
0,25 < IG ≤ 0,50	Moderado
0,51 < IG ≤ 0,75	Severo
IG > 0,75	Crítico

Fuente: modificado de Muñoz (2007).

Adicionalmente, se calculó el impacto global neto (IG_{NETO}) mediante la expresión (Muñoz, 2007):

$$IG_{NETO} = IG_{ES} - IG_{EI}$$

donde:

IG_{NETO} : Impacto global neto.
$IG_{(ES)}$: Impacto global del escenario con sistemas de producción (con proyecto).
$IG_{(EI)}$: Impacto global del escenario inicial (sin proyecto).

5.2.5. Plan de manejo ambiental

El plan de manejo ambiental (PMA) se elaboró en concordancia con las evaluaciones de impacto ambiental de las actividades en los sistemas de producción. Se formularon estrategias, programas y proyectos orientados a establecer medidas de prevención, mitigación, corrección, compensación y potenciación de los impactos derivados de estas actividades, según lo establecido por el MAVDT (2005, 2010) y Rodríguez (2009).

5.3. Resultados y discusión

5.3.1. Oferta ambiental del territorio

Sistema biótico. El 43,7% del área total de la cuenca del río Combeima está cubierta de bosques, mientras que los cultivos y pastos manejados ocupan el 14,4% y el resto se encuentra distribuido en áreas sin uso agropecuario y forestal (Geotec, 2012). Según los índices de diversidad de Margalef (D_{mg}) y Menhinick (D_{mn}), la cuenca del río Combeima posee alta riqueza en especies vegetales y baja dominancia de las mismas (Cortolima & Corpoica, 2009). Las especies florísticas que presentan el mayor índice de valor de importancia (IVI) son, en orden descendente, arenillo (*Sterculia* sp), encenillo (*Weimannia pubensens*), laurel (*Liacaria* sp) y flautón (*Oreopanax* sp). Además de esto, se encontraron 27 especies de flora en peligro crítico dentro de esta área geográfica. En cuanto a la fauna, se encontraron 12 especies de anfibios, 4 de reptiles, 25 de mamíferos, 6 de peces y 279 de aves, las cuales están listadas en los libros rojos de especies amenazadas en zonas de ladera entre los 1450-3600 m de altitud (Losada & Carvajal, 2005; Muñoz *et al*., 2014).

Sistema abiótico. La cuenca del río Combeima presenta diversidad climática, desde nieves perpetuas en alturas superiores a los 5000 m, hasta climas cálidos en la desembocadura. En su parte media la cuenca se caracteriza por topografía de pendientes onduladas a muy escarpadas, con pendientes promedio de 57%. La geología predominante es de esquistos duros a blandos, con características de baja resistencia y estabilidad (Geotec, 2012). La fisiografía de la cuenca es de montaña fría y muy húmeda, caracterizada por presentar suelos entre superficiales y moderadamente profundos, bien drenados, ácidos, de texturas medianas, pobres en materia orgánica y fertilidad muy baja (Cortolima, Corpoica, SENA & Universidad del Tolima, 2006).

Según la Resolución 2115 del 2007, los resultados de los análisis físico-químicos de las aguas colectadas mostraron elevada concentración de compuestos minerales (sales de magnesio [Mg] y calcio [Ca]), calcio orgánico total [COT], contaminación por materia orgánica y altas concentraciones de

metales pesados como plomo [Pb], níquel [Ni] y cadmio [Cd] en todas las estaciones. Los índices de contaminación por mineralización (Icomi), por sólidos suspendidos (Icosus) y por materia orgánica (Icomi) mostraron valores medio-altos. Asimismo, los índices bióticos (Saprobio y ASPT) indicaron leve contaminación orgánica. La predominancia de familias de macroinvertebrados acuáticos como *Elmidae, Baetidae, Leptophlebiidae y Veliidae* indicaron que las aguas son limpias o ligeramente contaminadas, oligotróficas o pobres en nutrientes (Roldán, 1996).

Sistema socioeconómico y cultural. Las zonas de ladera de la cuenca del río Combeima ofrecen diversos hábitats para las especies de flora y fauna; asimismo, los ecosistemas boscosos de esta contribuyen a la regulación del clima, el ciclaje de nutrientes, el volumen de escorrentía, la cantidad y calidad del agua y la captura de carbono. Además, estos ecosistemas ofrecen zonas con belleza paisajística.

La fuerza humana es la que mayor desempeño aporta en las actividades agropecuarias. Los habitantes de la zona subsisten económicamente de los ingresos agropecuarios: 76% corresponden a la agricultura y 24% a las actividades pecuarias. Sumado a esto, llevan a cabo actividades extraprediales, como el trabajo en otras fincas. En estas zonas de ladera no predomina el servicio de acueducto y alcantarillado, ni se cuenta con un sistema de recolección, transporte y disposición de basuras. Para evacuar los desperdicios, estos se botan a la quebrada, los entierran o los queman al aire libre o en el fogón. Las vías existentes son terciarias y presentan mal estado.

5.3.2. Demanda ambiental de los sistemas de uso del suelo

En términos generales, se encontró que las actividades desarrolladas en los sistemas de uso del suelo (LUS) en la cuenca se adelantan con baja transferencia y utilización de tecnologías, lo que limita el uso adecuado de insumos y recursos, y se caracterizan por la ejecución de las siguientes etapas:

Presiembra. Se obtienen plántulas y semillas, tanto del Comité de Cafeteros como de la Asociación Hortofrutícola de Colombia (Asohofrucol). Para el caso de las semillas, la germinación se realiza principalmente en germinadores de piso y se emplean fertilizantes como la urea y el 15-15-15, aplicados en dosis fuera de lo recomendado. Las plántulas son trasplantadas a las 4-6 semanas a bolsas de polietileno negro, de 20 × 15 cm, perforadas a los lados, hasta que alcanzan una altura de 7 a 12 cm.

Preparación del terreno. En la preparación del terreno se desarrollan dos fases, el alistamiento y el establecimiento. El alistamiento no se realiza en la totalidad del lote, sino que las labores se adelantan, principalmente, en el sitio

donde se va a establecer la planta. Las labores comienzan con el rozado manual, mediante machete y azadón, en un radio de 20 a 40 cm. Luego se airea y mulle el terreno, entre 20 y 30 cm de profundidad, con el fin de permitir una mejor penetración radicular de las plántulas. Finalmente, se lleva a cabo un proceso de desinfección, sobre todo con cal, aplicada de forma directa y por fuera de las dosis recomendadas. En el establecimiento los productores prefieren sembrar en dos temporadas: abril-mayo y octubre-noviembre. Se planta esencialmente en cuadro, con distancia de siembra variable dependiendo del cultivo.

Mantenimiento del cultivo. En esta etapa se desarrollan dos fases, el abonado y el manejo. El abonado se realiza entre 8 y 32 veces al año, según el cultivo, principalmente con productos inorgánicos como 15-15-15, 16-16-16, Agrocafé y Ferticol, por fuera de las dosis recomendadas. En el manejo se hacen podas de formación (desde que la planta alcanza los 40 cm de altura), saneamiento —en caso de enfermedades y ramas secas— y rejuvenecimiento, así como labores de deshierba, con una frecuencia que varía de 8 a 36 veces al año. Además, se maneja la sombra de los LUS a través del diseño de sistemas agroforestales con plátano (*Musa* AAB) o árboles como el cedro rosado (*Cedrela odorata* L), guamo (*Inga* spp) y árbol loco (*Montanoa ovitafolia*). La densidad de árboles varía entre 2 y 250 individuos/ha.

Control fitosanitario. El control de malezas, plagas y enfermedades que atacan los cultivos se hace mediante fumigaciones con productos de diverso grado de toxicidad (como Glifocafé, Glifosol, Glifosato, Dithane, Lorsban y Acarotal), con una frecuencia variable entre 12-32 veces al año. Las dosis son proporcionadas en su mayoría por fuera de lo recomendado y el personal que aplica estos productos no usa los elementos de protección adecuados ni lleva a cabo prácticas de higiene para retirar los residuos de estos productos.

Cosecha. La cosecha varía según el cultivo, aunque generalmente se realiza semanal o mensualmente. La recolección se hace en canastillas o lonas, según el producto, y se almacena luego, en su mayoría, en un cuarto de la casa.

Poscosecha. El fruto es seleccionado por el grado de maduración y color, y se empaca en cajas plásticas y lonas. El producto final es transportado en carro al poblado Pastales, donde es vendido, la mayoría de las veces, a un intermediario.

Manejo y disposición de residuos. En promedio se generan 1,82 t/ha/año de residuos sólidos, de los cuales el 99% son orgánicos. El 67% son dejados en el suelo para contribuir a la fertilidad y el resto se quema junto con los inorgánicos. También se generan residuos líquidos (1,66 m^3/ha/año en promedio) con carga contaminante, que son descargados principalmente en el suelo.

5.3.3. Evaluación del impacto ambiental

Chequeo de efectos ambientales generados por los sistemas de uso del suelo. Se encontraron en total 101 impactos ambientales originados por los LUS, de los cuales el 62,4% son de carácter negativo y el 37,6% positivos (Tabla 11).

Tabla 11
Matriz chequeo de efectos ambientales generados en las etapas de los sistemas de uso del suelo (LUS) en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia)

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Actividades de los sistemas de uso del suelo									Cantidad de interacciones (%)			
			PS	PT		MC		CF	CO	PC	MD	Componente	Subsistema	Sistema	Medio ambiente
Sistema	Subsistema	Componente		AL	E	A	M								
Medio Ambiente	Biótico	Biodiversidad													
		Flora										2,9	6,9	13,7	100
		Fauna										3,9			
		Servicios ambientales													
		Aprovisionamiento										2,9	6,9		
		Regulación										3,9			
	Abiótico	Atmósfera													
		Calidad del aire										2	2	26,5	
		Agua													
		Dinámica de cauces										1	7,8		
		Disponibilidad										1			
		Calidad										5,9			
		Suelo													
		Calidad física										2,9	9,8		
		Calidad química										3,9			
		Calidad microbiológica										2,9			
		Servicios ambientales													
		Regulación										6,9	6,9		
	Socioeconómico y cultural	Capital natural													
		Disfrute de SA de aprovisionamiento										7,8	16,7	59,8	
		Disfrute de SA de regulación										5,9			
		Disfrute de SA culturales										2,9			
		Capital humano													
		Empleo										6,9	20,6		
		Demográfico										4,9			
		Salud										8,8			
		Capital social													
		Participación social										4,9	4,9		
		Capital económico													
		Subsistencia económica										6,9	6,9		
		Capital físico													
		Vivienda										1	10,8		
		Servicios básicos										1			
		Recolección de basuras										7,8			
		Transporte veredal										1			
Cantidad de interacciones (%)		Fase	6,9	18,6	9,8	11,8	7,8	15,7	9,8	10,8	8,8				
		Etapa		28,4		19,6									
		Sistemas	100												

En color rojo cuando el carácter es negativo (disminución, desmejora o pérdida de calidad ambiental) y en verde cuando es positivo (aumento, mejora o ganancia de calidad ambiental). P: presiembra; PT: preparación del terreno; AL: alistamiento; E: establecimiento, MC: mantenimiento del cultivo; A: abonada; M: manejo; CF: control fitosanitario; CO: cosecha; PC: poscosecha; MD: manejo y disposición de residuos.

Las interacciones mostraron que las actividades que más generan impactos son la preparación del terreno (28,4%) y el mantenimiento del cultivo (19,6%), en las fases de alistamiento (18,6%) y control fitosanitario (15,7%). El sistema ambiental con mayor número de interacciones fue el socioeconómico (59,8%), seguido del abiótico (26,5%). Los subsistemas que presentaron más interacciones fueron el capital humano (20,6%) y el natural (16,7%). En el caso de los componentes, la mayor cantidad de interacciones se presentaron en la salud (8,8%), el disfrute de servicios ambientales de aprovisionamiento (7,8%) y la recolección de basuras (7,8%), pertenecientes únicamente al sistema socioeconómico (Tabla 11).

Importancias unitaria y relativa de los impactos. La IU e IR de las interacciones entorno-proyecto permitieron determinar las actividades más impactantes de la situación con LUS (o con proyecto) (Tabla 12).

Impactos en los sistemas de uso del suelo. La etapa más generadora de impactos negativos en los LUS fue al preparar el terreno (IR de –10,3), que conlleva las fases de alistamiento y establecimiento (IR de –8,2 y –2,1, respectivamente). Estas labores afectan factores ambientales de importancia y con baja resiliencia ambiental y alta sinergia en el desarrollo simultáneo de varias actividades. A pesar de que estas fases son de menores cargas temporales, dado que se realizan una vez por ciclo, tienen gran relevancia por la afectación primaria, secundaria y de manera permanente a factores ambientales como el suelo.

La disminución de la cobertura vegetal en el alistamiento contribuye inicialmente a la generación de impactos asociados al sistema biótico, como la disminución de valor ecológico, captura de carbono, presencia de especies endémicas y protegidas y diversidad faunística. Según Ávila & Cruz (2008), Giuffré (2008) y Rojas *et al.* (2012), el desmonte del terreno y el laborado intensivo en estas fases consolida el surgimiento de cambios en la calidad física del suelo, como disminución de la estabilidad estructural, aumento de procesos morfodinámicos (erosión) y alteración en las tasas de infiltración.

Otra etapa representativa en la generación de impactos y efectos negativos fue el control fitosanitario, con un IR de –6. En esta etapa se realizan actividades de control químico de arvenses y para el control de plagas y enfermedades, al igual que la aplicación de agrotóxicos e insumos agrícolas a base de nitrógeno y fósforo, los cuales impactan el suelo y el agua, además de afectar la salud de los productores, tal como lo mencionan Chacón (2008), Monroy (2009) y Betancur *et al.* (2014) en cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum*), papa (*Solanum tuberosum*) y mora (*Rubus ulmifolius*), respectivamente.

Tabla 12

Matriz de evaluación de las importancias unitaria (IU) y relativa (IR) de los impactos ambientales generados en las etapas de los sistemas de uso del suelo (LUS), en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia).

Nivel 1	Nivel 2				Nivel 3		Actividades de los sistemas de uso del suelo									Importancia relativa (IR)			
							PS	PT		MC		CF	CO	PC	MD	COMPONENTE	SUBSISTEMA	SISTEMA	MEDIO AMBIENTE
	Sistema	IS	Subsistema	IB	Componente	IC		AL	E	A	M								
MEDIO AMBIENTE	Biótico	260	Biodiversidad	190	Flora	140		-22			10	-13				-3,5	-4,6	-5,3	-24,5
					Fauna	50		-12			11	-11			-9	-1,1			
			Servicios ambientales	70	Aprovisionamiento	20		-12			10		13			0,2	-0,8		
					Regulación	50		-16			14	-9			-9	-1,0			
	Abiótico	505	Atmósfera	20	Calidad del aire	20		-11						-10		-0,4	-0,4	-16,9	
			Agua	200	Dinámica de cauces	70		-13								-0,9	-8,5		
					Disponibilidad	50		-16								-0,8			
					Calidad	80	-10	-13	-12	-16		-17			-17	-6,8			
			Suelo	200	Calidad física	115		-9	-10				-19			-4,4	-6,2		
					Calidad química	50		14		-11		-19			9	-0,4			
					Calidad microbiológica	35		-13		-13		-15				-1,4			
			Servicios ambientales	85	Regulación	85		-15	13	13	16	-16	-16		-16	-1,8	-1,8		
	Socioeconómico y cultural	235	Capital natural	95	Disfrute de SA aprovisionamiento	73	-9	-17	-9	-10	13	-9	16	13		-0,9	-2,0	-2,3	
					Disfrute de SA de regulación	20		-14		-9	9	-14	-13		-13	-1,1			
					Disfrute de SA culturales	2		-17				-10			-13	-0,1			
			Capital humano	57	Empleo	25	8	11	8	9		9	16	10		1,8	-0,5		
					Demográfico	7			-10	-10		-10	16	13		0,0			
					Salud	25	-8	-9	-13	-10	-8	-16	-8	-8	-12	-2,3			
			Capital social	10	Participación social	10	10		10	10		10		13		0,5	0,5		
			Capital económico	23	Subsistencia económica	23	8	11	8	9		9	13	13		1,6	1,6		
			Capital físico	50	Vivienda	10								13		0,1	-1,9		
					Servicios básicos	10								13		0,1			
					Recolección de basuras	25		-12	-13	-13		-17	-10	-10	-14	-2,2			
					Transporte veredal	5								8		0,0			
Importancia relativa del impacto					Fase		-1,2	-8,2	-2,1	-4,2	2,3	-6,4	-2,0	1,4	-4,1				
					Etapa			-10,3		-1,9									
					Sistemas		24,5												

IS: importancia del sistema ambiental; IB: importancia del subsistema ambiental; IC: importancia del componente ambiental; PS: presiembra; PT: preparación del terreno; AI: alistamiento; E: establecimiento; MC: mantenimiento del cultivo; A: abonada; M: manejo; CF: control fitosanitario; CO: cosecha; PC: poscosecha; MD: manejo y disposición de residuos.

El sombreamiento en los LUS mostró un impacto de carácter positivo de 2,3. Según Paz y Sánchez (2007), los cultivos bajo sombra tienen efecto positivo en los suelos, ya que incrementan su materia orgánica, causando mejor capacidad de retención de la humedad que los suelos a libre exposición. Además, Rojas *et al.* (2012) concluyeron que los cultivos bajo sombra, por ser sistemas de producción más amigables con el entorno, pueden llegar a restablecer suelos erosionados porque logran adaptar características similares a las de los bosques mesófilos. Por esta razón, se puede inferir que el sombreamiento sirve de agente mitigador de impactos generados en otras etapas.

Impactos en el sistema ambiental abiótico. El sistema ambiental abiótico fue el más impactado, según el análisis realizado (IR de –16,9), siendo el agua el subsistema que presenta mayor IR, seguido del suelo (–8,5 y –6,2, respectivamente). La calidad del agua (IR de –6,8) puede verse afectada por sólidos en suspensión provenientes de las malas prácticas agrícolas que acentúan la erosión de los suelos, y por organismos vivos y componentes químicos generados principalmente por el uso intensivo de pesticidas y fertilizantes. Asimismo, la calidad del agua puede verse deteriorada por la inadecuada disposición de residuos sólidos (como envases de pesticidas, fertilizantes, bolsas de agroinsumos) y líquidos (sustancias derivadas de la descomposición de sólidos, vertederos y fertilizantes), en las etapas de mantenimiento del cultivo y manejo y disposición de residuos, propias de los LUS.

El transporte de residuos orgánicos y químicos a las fuentes hídricas ocurre por escurrimiento, infiltración, percolación e, indirectamente, por flujos superficiales. Esto se traduce en altas concentraciones de nitratos, fosfatos y metales pesados como zinc, cobre y cadmio en los cursos de agua (Guerrero, 2011). Este resultado concuerda con lo encontrado por Chacón (2008), Torrellas *et al.* (2011) y Ramos *et al.* (2015) en cultivos de tomate y cacao (*Theobroma cacao* L.), quienes reportaron que las etapas de mantenimiento del cultivo y manejo y disposición de residuos son las de mayor trascendencia. Vale la pena mencionar que esta importancia es aún más relevante debido al carácter sinérgico del impacto, producto de la constante labor en cada una de estas etapas, lo cual ocasiona una afectación mayor.

Por su parte, la calidad física del suelo (IR de –4,4) se vio afectada negativamente, al respecto las fases de control fitosanitario y preparación del terreno son las de mayor peso. Estos tipos de cultivos se caracterizan por un laboreo intensivo, dejando el suelo expuesto a los agentes que producen su erosión o degradación. Ghersa *et al.* (2002) y Giuffré (2008) señalan que el subsistema suelo posee las mayores cargas temporales y manifestaciones de degradación a consecuencia del desmantelamiento del terreno, traducidas en pérdidas de materia orgánica y nutrientes, erosión y compactación.

- *Impactos en el sistema ambiental biótico.* El segundo sistema ambiental con mayor IR fue el biótico (IR de –5,3), en el que la flora fue el componente de mayor valor (IR de –3,5). Como señalan Chiquito y Zuluaga (2007) en el estudio ambiental de papa y Ramos *et al.* (2015) de cacao, la deshierba, siembra y manejo del cultivo son las que inciden primordialmente en el desmantelamiento de la cobertura vegetal, generando afectaciones en la micro- y mesofauna del suelo, deterioro del hábitat de la fauna silvestre, fragmentación de la cobertura vegetal, erosión y alteración del balance de nutrientes del suelo. Estos fenómenos causan disminución en la calidad de bienes y servicios ambientales aportados por el sistema biótico y abiótico en la cuenca.
- *Impactos en el sistema ambiental socioeconómico y cultural.* La IR de los impactos socioeconómicos generados por los LUS en su mayoría fueron de carácter positivo y servían como agentes reguladores del impacto generado, por lo que este sistema ambiental presentó la menor IR (–2,3), aunque tuvo mayor número de interacciones.

El subsistema ambiental del capital humano obtuvo en el componente salud un valor IR de –2,3. Este resultado es semejante a lo reportado por el MAVDT (2004) en la Guía Ambiental Hortofrutícola, Díaz (2010) en cultivos perenes y anuales y Ramos *et al.* (2015) en cultivos de cacao. Aunque este impacto es medianamente intenso, sinérgico y reversible, se presenta de manera persistente debido a que en los trabajos asociados a la agricultura y la producción agropecuaria se producen riesgos laborales de tipo físicos, biológicos y ergonómicos. Además, las alteraciones en la calidad del agua aumentan la incidencia de enfermedades asociadas al recurso hídrico, y la aplicación de productos químicos el riesgo a intoxicaciones.

El capital natural fue el subsistema socioeconómico con mayor IR (–2,0). Los factores alterados tienen que ver con la pérdida del disfrute de los bienes y servicios ambientales de aprovisionamiento, regulación y culturales, que son inherentes a los sistemas biótico y abiótico afectados en todas las etapas de los LUS. Asimismo, el componente de recolección de basuras en los LUS obtuvo una IR de –2,2 debido a que en las etapas de la producción se generan residuos. La mala disposición de estos en la cuenca contamina los suelos y aguas. El impacto generado tiende a ser más negativo cuando los residuos son de tipo inorgánico y con baja biodegradación en el ambiente.

Los LUS también generan etapas y fases que incrementan el empleo (IR de 1,8) y la subsistencia económica (IR de 1,6) en forma de ingresos, e inciden positivamente en el sistema socioeconómico. Aunque estos no son impactos grandes, ni en extensión ni en intensidad, y tampoco son irreversibles,

presentan alta persistencia y momento, lo cual contribuye a la mejora de otros factores del ambiente como en la adquisición de productos y servicios. Además, los valores de IR de estas fases y etapas compensan algunos impactos negativos generados en el subsistema capital humano, como el impacto generado en el componente salud. Villegas (2002) y Siles y Gutiérrez (2012) señalaron la importancia del fortalecimiento de los capitales humano, social y económico como articuladores del desarrollo sostenible, ya que contribuyen a la búsqueda de nuevas capacidades y relaciones institucionales para la gobernanza ambiental y el ejercicio de buenas prácticas en el territorio.

La jerarquización mostró que 89,5% de los impactos ambientales de carácter positivo relacionados con las acciones de los LUS tienen baja o medianamente alta importancia (Tabla 13). Tan solo 13% de estos efectos son altos y no se encontraron impactos muy altos en este sistema.

Tabla 13
Jerarquización y balance de los impactos ambientales generados en los sistemas de uso del suelo (LUS), en la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia)

Impactos positivos					
Intervalo de IU	Nivel de importancia	n_i	N_i	h_i (%)	H_i (%)
8-11	Bajo	21	21	55,3	55,3
11-14	Medianamente bajo	13	34	34,2	89,5
14-17	Medianamente alto	4	38	10,5	100,0
Total		38		100,0	

Impactos negativos					
Intervalo de IU	Nivel de importancia	n_i	N_i	h_i	H_i
8-11	Irrelevante	27	27	42,9	42,9
11-14	Moderado	19	46	30,1	73,0
14-17	Relevante	14	60	22,2	95,2
17-20	Severo	2	62	3,2	98,4
20-23	Crítico	1	63	1,6	100
Total		63		100	

n_i: frecuencia absoluta; N_i: frecuencia absoluta acumulada; h_i: frecuencia relativa; H_i: frecuencia relativa acumulada.

En cuanto a los efectos de carácter negativo, se encontró que el 95,2% tiene nivel de importancia entre irrelevantes y relevantes, generados principalmente en la preparación del terreno y el control fitosanitario, que impactaron negativamente los sistemas abiótico y biótico. Son pocos los impactos con

nivel severo o crítico (4,8%) y se presentan en: 1) la etapa de preparación del terreno, que incide en la flora, 2) el control fitosanitario, que reduce la calidad química de los suelos (principalmente en la capacidad de intercambio catiónico), y 3) la cosecha, que por el transporte de personal sobre el cultivo causa su compactación.

Impacto global (IG) de los sistemas de uso del suelo

- *Escenario inicial (situación "sin proyecto").* Según el estudio realizado por Claros y Santamaría (1998), las zonas de ladera de la cuenca del río Combeima se caracterizaban por la tenencia de gran propiedad en las tres primeras décadas del siglo XX. El área de la cuenca hacía parte de la hacienda Gran Tolima, propiedad de Martín Restrepo, y era subarrendada por campesinos de la región. La mayor parte del suelo se aprovechaba en el valle y las laderas adyacentes, donde se tenían cultivos anuales que ocupaban poca extensión (yuca —*Manihot esculenta*—, arracacha —*Arracacia xanthorrhiza*—, cebolla —*Allium cepa*—, hortalizas, flores y pastos de corte), los cuales servían para el abastecimiento de las necesidades familiares y la generación de ingresos en Ibagué (Medina *et al.,* 1975). También se sembraban cultivos de pancoger —café (*Coffea arabica* L.), plátano (*Musa* AAB) y caña (*Saccharum officinarum*)— de forma intensiva y destinaban áreas de potreros y rastrojos en las que predominaban pastos naturales, con un gran sobrepastoreo y predios altamente intervenidos.

Debido a la presión ejercida sobre el ecosistema boscoso, en los años posteriores a 1925, por efecto de la explotación de madera el bosque natural pasó a ser un bosque secundario degradado, con composición heterogénea, de bajo valor comercial y una extensión remanente del 58,3% del área original. La degradación del bosque generó diversos impactos ambientales sobre la cuenca. Se presentaron diferentes tipos de erosión tanto en la parte medio-alta como baja de la microcuenca. La erosión más crítica —en cárcavas— se presentó en la parte alta, originada por la concentración del escurrimiento superficial en áreas con pendiente superior al 60%, usadas para establecer cultivos a suelo desnudo, como la cebolla. La erosión severa, con escurrimiento difuso e intenso, se observó en la parte baja de la cuenca, allí las áreas destinadas para los cultivos y el pastoreo fueron mayores. Por último, en la parte media se observó erosión ligera, caracterizada por escurrimiento difuso en áreas de cultivos y pastoreo de poca intensidad.

El principal uso del agua de la cuenca era el consumo de las familias que vivían en la zona. Además, la quebrada fue reconocida en esa época por

su contribución a diversos usos para la ciudad de Ibagué. Por otro lado, los impactos de las actividades antrópicas en el escenario inicial reflejan que la actividad más importante era la ganadería, con predominancia de efectos críticos, y los cultivos de pancoger exhibían mayor degradación por el uso de productos químicos con alto nivel de toxicidad y baja transferencia de tecnología (Tabla 14). El sistema ambiental más afectado en este escenario fue el abiótico, con predominancia de impactos asociados a componentes de baja resiliencia ambiental, como el suelo. En todo este conjunto de situaciones el nivel de afectación ambiental global (IG) para el escenario inicial fue de –0,60 (Tabla 15), el cual es calificado como severo (Muñoz, 2007).

- *Escenario con sistemas de uso del suelo (situación "con proyecto").* Los LUS en la cuenca del río Combeima generan un IG total de –0,25 (Tabla 14), que se califica como moderado (Muñoz, 2007). Este resultado concuerda con los hallazgos del nivel jerárquico de las IU (Tabla 13), que muestra la predominancia de impactos de menor peso, según sus atributos. Un resultado más grave fue reportado por Ramírez (2002) para fincas ganaderas de la Amazonia colombiana, donde se obtuvo un IG severo. Este resultado se atribuyó a que las actividades practicadas en sistemas ganaderos se manifiestan con intensidades y extensiones muy altas, lo cual causa IU e IR mayores que en los sistemas de producción agrícolas.
- *Impacto global neto.* Bajo las condiciones descritas, el impacto global neto (IGNETO) de los LUS en la microcuenca de la quebrada La Plata es:

$$IG_{NETO} = -0{,}25 - (-0{,}60)$$
$$IG_{NETO} = 0{,}35$$

Conforme a la escala calificativa del impacto global neto, representada en la Tabla 10, el valor de esta variable, calificado como moderadamente positivo, permite interpretar que la transición de ganadería y agricultura tradicional hacia los LUS analizados —mayormente permanentes— ha conllevado una mejora en el medioambiente. Sin embargo, a pesar de que los impactos generados por los LUS varían de irrelevantes a relevantes, la implementación de estos en nuevas áreas de la cuenca que impliquen pérdida boscosa o de zonas naturales incrementaría el valor a negativo del IG neto y probablemente elevarían la categoría de los impactos a relevantes. Por tanto, a futuro se debe ofrecer a los productores alternativas productivas más armónicas con el medioambiente, tal como los sugiere Muñoz (2007) en la Amazonia colombiana, donde se pueden corregir las actividades con mayor impacto ambiental negativo de los actuales LUS, y que modifiquen el IGNETO hasta niveles altamente positivos.

Tabla 14

Matriz de evaluación del impacto global (IG) de los impactos ambientales generados en el escenario inicial, "sin proyecto", en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia)

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3		Actividades antrópicas				Impacto global (IG)					
							Pancoger							
	Sistema	Subsistema	Componente	IC	*AF*	*GI*	*CT*	*CP*	TOT_i	$\sum\|I_i\|$	$IC_j*(\sum\|I_i\|)$	$\sum IC_j*\sum\|I_i\|$	*IG*	NIVEL
MEDIO AMBIENTE	Biótico	Biodiversidad	Flora	140	-20	-22	-14	-14	-70	70	9800	59921	-0,60	*SEVERO*
			Fauna	50	-14	-19	-14	-14	-61	61	3050			
		Servicios ambientales	Aprov.	20	-9	-13	-10	-10	-42	42	840			
			Regulación	50	-19	-19	-14	-14	-66	66	3300			
	Abiótico	Atmósfera	Calidad del aire	20		-11	-11	-11	-33	33	660			
		Agua	Dinámica de cauces	70		-18	-16	-16	-50	50	3500			
			Disponibilidad	50	-16	-22	-19	-19	-76	76	3800			
			Calidad	80		-21	-16	-16	-53	53	4240			
		Suelo	Calidad física	115	-13	-21	-19	-17	-70	70	8050			
			Calidad química	50	-10	-15	-10	-10	-45	45	2250			
			Calidad microbiológica	35		10	-10	-10	-10	30	1050			
		Servicios ambientales	Regulación	85	-21	-21	-18	-18	-78	78	6630			
	Socioeconómico y cultural	Capital natural	Disfrute de SA de aprov.	73	11	-20	-12	-12	-33	55	4015			
			Disfrute de SA de regulación	20	-18	-18	-18	-18	-72	72	1440			
			Disfrute de SA culturales	2	-11	-15	-15	-15	-56	56	112			
		Capital humano	Empleo	25	13	13	13	13	52	52	1300			
			Demográfico	7		10	-8	-8	-6	26	182			
			Salud	25		-18	-18	-18	-54	54	1350			
		Capital social	Participación social	10		8		8	16	16	160			
		Capital económico	Subsistencia económica	23	12	17	12	18	59	59	1357			
		Capital físico	Vivienda	10	8	8	8	8	32	32	320			
			Servicios básicos	10	8	8	8	8	32	32	320			
			Recolección de basuras	25	-17	-20	-20	-20	-77	77	1925			
			Transporte veredal	5	12	14	14	14	54	54	270			

IC: importancia del componente ambiental; AF: aprovechamiento forestal; GI: ganadería intensiva; CT: cultivos transitorios; CP: cultivos permanentes.

Tabla 15

Matriz de evaluación del impacto global (IG) de los impactos ambientales generados por los sistemas de uso del suelo, escenario "con proyecto", en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia)

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3		Actividades de los sistemas de uso del suelo									Impacto global (IG)					
				PS	PT		MC		CF	CO	PC	MD	TOT_j	$\sum\|I_i\|$	$IC_j*(\sum\|I_i\|)$	$\sum IC_j*(\sum\|I_i\|)$	IG	NIVEL
	Sistema	Subsistema	Componente	IC	AL	E	A	M										
MEDIO AMBIENTE	Biótico	Biodiversidad	Flora	140	-22			10	-13				-25	45	6300	55564	-0,25	MODERADO
			Fauna	50	-12			11	-11			-9	-21	43	2150			
		Servicios ambientales	Aprov.	20	-12			10		13			11	35	700			
			Regulación	50	-16			14	-9			-9	-20	48	2400			
	Abiótico	Atmósfera	Calidad del aire	20	-11						-10		-21	21	420			
		Agua	Dinámica de cauces	70	-13								-13	13	910			
			Disponibilidad	50	-16								-16	16	800			
			Calidad	80	-10	-13	-12	-16		-17			-17	-85	85	6800		
		Suelo	Calidad física	115		-9	-10				-19			-38	38	4370		
			Calidad química	50		14		-11		-19			9	-7	53	2650		
			Calidad microbiológica	35		-13		-13		-15				-41	41	1435		
		Servicios ambientales	Regulación	85		-15	13	13	16	-16	-16		-16	-21	105	8925		
	Socioeconómico y cultural	Capital natural	Disfrute de SA de aprov.	73	-9	-17	-9	-10	13	-9	16	13		-12	96	7008		
			Disfrute de SA de regulación	20		-14		-9	9	-14	-13		-13	-54	72	1440		
			Disfrute de SA culturales	2		-17				-10			-13	-40	40	80		
		Capital humano	Empleo	25	8	11	8	9		9	16	10		71	71	1775		
			Demográfico	7			-10	-10		-10	16	13		-1	59	413		
			Salud	25	-8	-9	-13	-10	-8	-16	-8	-8	-12	-92	92	2300		
		Capital social	Participación social	10	10		10	10		10		13		53	53	530		
		Capital económico	Subsistencia económica	23	8	11	8	9		9	13	13		71	71	1633		
		Capital físico	Vivienda	10								13		13	13	130		
			Servicios básicos	10								13		13	13	130		
			Recolección de basuras	25		-12	-13	-13		-17	-10	-10	-14	-89	89	2225		
			Transporte veredal	5								8		8	8	40		

IC: importancia del componente ambiental; PS: presiembra; PT: preparación del terreno; AI: alistamiento; E: establecimiento; MC: mantenimiento del cultivo; A: abonada; M: manejo; CF: control fitosanitario; CO: cosecha; PC: poscosecha; MD: manejo y disposición de residuos.

5.3.4. Plan de manejo ambiental

Debido a la importancia ecológica, económica y social de los subsistemas suelo y agua, y los componentes ambientales flora, salud, recolección de basuras, empleo y subsistencia económica, que fueron los elementos del ambiente más afectados, se hace necesaria la implementación de estrategias conjuntas entre entidades gubernamentales y no gubernamentales que aporten a mejorar la situación actual de la cuenca. Por esta razón se propuso un plan de manejo ambiental con programas tendientes a prevenir, mitigar, reducir, compensar o potencializar los impactos ambientales generados (Tabla 16).

Tabla 16
Síntesis de medidas contempladas en el plan de manejo ambiental (PMA) para las actividades propias de los sistemas de uso del suelo en laderas de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia).

Objetivo	Programa	Acciones a desarrollar
Recuperar la cobertura vegetal por las actividades de preparación del terreno y control fitosanitario en los LUS de la cuenca del río Combeima.	Reforestación y expansión de sistemas agroforestales multipropósito.	Promoción para la implementación de sistemas agroforestales con especies nativas.
		Provisión y siembra de árboles de sombrío y cercas vivas.
		Manejo de zonas boscosas de mitigación dentro de los predios.
		Promoción para un posible establecimiento de esquema de pago por servicios ambientales (PSA).
Prevenir y controlar las afectaciones generadas en el suelo por las actividades propias de los LUS en la cuenca del río Combeima.	Manejo integral del suelo y recuperación de áreas degradadas.	Capacitación sobre el uso adecuado de agroinsumos.
		Recuperación de áreas degradadas en zonas críticas con barreras de costales.
		Compostaje y adición de materia orgánica al suelo.
		Descanso y rotación de sitios de cultivo.
Prevenir y mitigar los impactos en el recurso hídrico ocasionados por la infiltración y lixiviación de residuos de agroquímicos y residuos sólidos a la cuenca del río Combeima.	Gestión integral del recurso hídrico.	Diseño y construcción de zanjillas de desagüe de lixiviados.
		Diseño y construcción de un pozo séptico.
		Mantenimiento de estos sistemas de control.

Objetivo	Programa	Acciones a desarrollar
Prevenir cualquier afectación o riesgo a la salud, y promover acciones de cuidado en los habitantes de la cuenca del río Combeima.	Seguridad y salud en la agricultura.	Capacitación de medidas de protección en el trabajo.
		Seguimiento de recomendaciones y provisión de equipos de protección personal (EPP) en el trabajo agropecuario.
		Tiempos de descanso e hidratación.
		Programar jornadas de salud comunitarias.
		Reactivar el funcionamiento permanente del puesto de salud USI-Pastales.
Potencializar las condiciones de generación de empleo y la agroindustria en la cuenca del río Combeima.	Agroindustria de subproductos y generación de empleo.	Consolidar una cooperativa entre productores para la producción de mermeladas y dulces de subproductos de los sistemas de uso del suelo.
		Capacitar a las personas sobre la creación de empresa.
		Adecuación de instalaciones y adquisición de equipos.
		Obtención de la materia prima.
		Transformación y elaboración de mermeladas y dulces a partir de los subproductos.
		Establecer convenios de comercialización.
Prevenir o mitigar el impacto que generan los residuos sólidos originados por las actividades propias de los LUS en la cuenca del río Combeima	Gestión de residuos sólidos.	Sensibilización y educación sobre manejo de residuos.
		Diseño y construcción de un centro de acopio en la parte media de la cuenca.
		Suscripción de convenios de cooperación interinstitucional.

5.4. Conclusiones

Las actividades desarrolladas en los actuales sistemas de uso del suelo establecidos en laderas de la cuenca del río Combeima producen en su mayoría impactos negativos, de irrelevantes a moderados, sobre los factores ambientales asociados a los sistemas abiótico y biótico, esencialmente en el suelo, agua y flora; por el contrario, los sistemas socioeconómico y cultural son favorecidos por ellas.

El impacto global neto moderadamente positivo permite pensar que es factible la recuperación ambiental de la cuenca. Estas actividades se podrían desarrollar aplicando la estrategia de incentivar el establecimiento de los actuales sistemas productivos en las áreas degradadas por las actividades productivas históricas.

El impacto global lleva a concluir que la implementación de los sistemas de uso del suelo estudiados constituye una mejora en la calidad ambiental de los elementos del ambiente. Esto se afirma debido a que esos sistemas han sido establecidos en zonas que ya estaban degradadas ambientalmente por el establecimiento de algunas prácticas agrícolas y ganaderas; estas últimas, ausentes hoy día en la zona.

Los impactos generados en componentes ambientales como el agua, el suelo y la salud pueden ser controlados con estrategias de manejo preventivas en las etapas y fases de los sistemas de uso del suelo, como la capacitación en el uso adecuado y seguro de agroquímicos y, esencialmente, siguiendo lo recomendado en las guías ambientales establecidas por el Ministerio de Ambiente para estos cultivos.

5.5. Agradecimientos

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Universidad del Tolima por financiar el proyecto "Servicios ecosistémicos aportados por sistemas agroforestales en laderas de la cuenca del río Combeima (departamento de Tolima, Colombia) a la gestión del recurso hídrico", que sirvió de referencia para realizar el presente estudio. Igualmente, agradecen el apoyo recibido de los integrantes del Grupo de Investigación en Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales (Proecut), del Laboratorio de Gestión Ambiental, del semillero en Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) y de los productores de las veredas Pastales, La Plata, El Brillante, El Resbalón y El Retiro, de la cuenca del río Combeima. Sin el concurso de todos estos actores habría sido imposible desarrollar los objetivos propuestos.

5.6. Referencias

Ávila, H., y Cruz, A. (2008). *Efecto de coberturas vegetales y época climática sobre la densidad de microorganismos totales y heterótrofos en suelos de la ecorregión cafetera colombiana* (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias, Bogotá.

Betancur, E., García, E. L., Barrera, E., Quejada, O., Rodríguez, H. D., y Arroyave Tobón, I. C. (2014). *Manual técnico del cultivo de mora bajo buenas*

prácticas agrícolas. Recuperado de http://www.cece.gva.es/ite/docs/Buenas_Prac_Tic.pdf

Borrás, L., Guío, A., *et al*. (2000). *Valoración ambiental y socioeconómica de los sistemas de producción predominantes en la zona de amortiguación del Parque Nacional Natural "Los Nevados" en los departamentos de Caldas y Quindío* (Tesis de Especialización). Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, Ibagué, Colombia.

Calderón, J. T., Prada, R. M., y Loyo, G. A. (2013). Métodos de evaluación de impacto ambiental en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 4*(2), 43-54.

Chacón, M. (2008). *Efectos sobre el ambiente del cultivo de tomate de mesa de larga vida variedad bonarda bajo condiciones controladas de invernadero* (Tesis de Especialización). Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química, Bogotá.

Chiquito, S., y Zuluaga, A. (2007). *Plan de acción ambiental, vereda El Bosque, cuenca alta del río Otún.* Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Claros, G., y Santamaría, G. (1998). *Evolución de la propiedad y uso del suelo en la parte media y superior de la cuenca del río Combeima, municipio de Ibagué* (Tesis de Pregrado). Universidad del Tolima, Facultad de Educación, Ibagué, Colombia.

Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima], Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica], Servicio Nacional de Aprendizaje [SENA], y Universidad del Tolima (2006). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica mayor del río Coello.* Ibagué, Colombia.

Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima], y Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica] (2009). *Estudio de estado actual (EEA) y plan de manejo (PM) de los páramos del departamento del Tolima*. Espinal, Colombia.

Díaz, L. (2010). *Estudio de impacto ambiental en la granja agrícola El Romeral* (Tesis de Maestría). Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Químicas, Cuenca, Ecuador.

Departamento Nacional de Planeación [DNP] (2009). *Documento Conpes 3570: Estrategias de mitigación del riesgo en la cuenca del río Combeima para garantizar el abastecimiento de agua en la ciudad de Ibagué*. Bogotá.

Espinoza, G., y Alzina, V. (Eds.) (2001). *Fundamentos de evaluación de impacto ambiental*. Santiago de Chile: Banco Interamericano de Desarrollo [BID] - Centro de Estudios para el Desarrollo [CED].

Geotec (2012). *Zonificación de amenazas de la cuenca del río Combeima.* Ibagué: Alcaldía de Ibagué - Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima].

Ghersa, C., Ferraro, D., Omacini, M., Martínez-Ghersa, M., y Perelman, S. (2002). Farm and landscape level variables as indicators of sustainable land-use in the Argentine Inland Pampa. *Agriculture, Ecosystems & Enviromental,* (93), 279-293.

Gómez, D. (2003). *Evaluación de impacto ambiental: un instrumento preventivo para la gestión ambiental* (2.ª ed.). Barcelona, España: Ediciones Mundi-Prensa.

Guerrero, M. (2011). *Determinación del efecto del uso del suelo (influencia antropogénica) sobre la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento de la población en la cuenca del río Sarapiquí* (Tesis de Maestría). Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, San José de Costa Rica.

Guiffré, L. (2008). *Agrosistemas. Impacto ambiental y sustentabilidad*. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía.

Helmer, O. (1966). *The Delphi method for systematizing judgements about the future. Institute of Government and Public Affairs*. Los Ángeles: Universidad de California.

Linares, M. (2015). *La estructura ecológica principal como modelo de ordenación territorial ambiental de la cuenca del río Combeima, departamento del Tolima*. Ibagué: Ediciones Universidad del Tolima.

Listone, H., y Tureff, A. (1975). *The Delphi Method: techniques and application.* Massachusetts: AddisonWesley Ed.

Losada, S., y Carvajal, A. (2005). Listado de especies de aves de la cuenca del río Coello (Tolima, Colombia). *Biota Colombiana* (6), 101-116.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT]. *Guía Ambiental Hortofrutícola*. Recuperado de http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_ Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/AGRICOLA%20Y%20PECUARIO/Gu%C3%ADa%20Ambiental%20para%20el%20subsector%20hortifruticola.pdf

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT] (2005). Decreto número 1220, "por el cual se reglamenta el título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales", Pub. L. núm. 1220. Bogotá.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT] (2010). *Metodología general para la presentación de estudios ambientales*. Bogotá.

Mazzucchelli, F., y Sánchez, A. (1999). Impacto ambiental de las explotaciones de vacuno lechero. *Bovis* (89), 15-25.

Medina, G., Rincón, J., Sandoval, V., y Lizcano, F. (1975). *Consideraciones físicas y socioeconómicas para el manejo integral de la subcuenca de la quebrada La Plata, proyecto río Coello*. Ibagué: Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal.

Molina, Z. (2002). *Evaluación del impacto ambiental de la agricultura del municipio de Rivas Dávila en la cuenca del r*ío Mocotíes (Tesis de Maestría). Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Monroy, O. (2009). *Caracterización de las prácticas agrícolas asociadas con el uso y manejo de plaguicidas en cultivos de papa. Caso vereda Mata de Mora, en el páramo de Merchán, Saboyá, Boyacá* (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Bogotá.

Muñoz, J. (2007). *Contribución a la sostenibilidad de los núcleos familiares asentados en fincas del piedemonte amazónico colombiano* (Tesis de doctorado). Universidad Agraria de La Habana "Fructuoso Rodríguez Pérez", Facultad de Agronomía, San José de Las Lajas, Cuba.

Muñoz, J., Guío, A., Andrade, H., Segura, M., Barrios, M., Lozada, S.,… Gómez, M. (2014). *Esquema de pago por servicios ambientales para la cuenca alta del río Combeima en el municipio de Ibagué* (*Tolima, Colombia*). Ibagué: Sello Editorial de la Universidad del Tolima.

Oesterheld, M. (2008). Impacto de la agricultura sobre los ecosistemas. Fundamentos ecológicos y problemas más relevantes. *Ecología Austral* (18), 337-346.

Paz, I., y Sánchez, P. (2007). Relación entre dos sistemas de sombrío de café y algunas propiedades físicas del suelo en la meseta de Popayán. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias, 5*(2), 40-46.

Pérez, U., y Bosque, J. (2008). Transiciones de la cobertura y uso de la tierra en el período 1991-2005 en la cuenca del río Combeima, Colombia. *Serie Geográfica*, (12): 163-178.

Pinos, J., García-López, J., Peña, L., Rendón, J., González, C., y Tristán, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia,* (46), 359-370.

Ramírez, B. (2002). *Diagnóstico ambiental y alternativas de desarrollo sostenible en fincas ganaderas establecidas en la Amazonia colombiana* (Tesis de

Doctorado). Universidad Agraria de La Habana "Fructuoso Rodríguez Pérez", Facultad de Ciencias Veterinarias, San José de Las Lajas, Cuba.

Ramos, A., Puentes, J., y Olaya, A. (2015). Diagnóstico y manejo ambiental del cultivo de cacao, con énfasis en sus recursos hídricos en el municipio de Campoalegre (Huila). *Revista Ingeniería y Región, 14*(2), 65-74.

Rodríguez, M. (2008). *Evaluación de impacto ambiental de café en el Parque Nacional Bahuaja Sonene*. Carabaya, Perú: Banco Interamericano de Desarrollo [BID].

Rodríguez, H. (2009). *Guía metodológica de estudios de impacto ambiental* (4.ª ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rojas, A., Hartman, K., y Almonacid, R. (2012). El impacto de la producción de café sobre la biodiversidad, la transformación del paisaje y las especies exóticas invasoras. *Ambiente y Desarrollo, XVI*(30), 93-104.

Roldán, G. (1996). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia*. Bogotá: Pama Editores.

Salomone, R. (2003). Life cycle assessment applied to coffee production: investigating environmental impacts to aid decision making for improvements at company level. *Food, Agriculture & Environment, 1*(2), 295-300.

Sanz, J. (1991). Concepto de impacto ambiental y su evaluación. En J. A. Plazas, Á. de J. Lema y J. D. León (2009). *Una propuesta estadística para la evaluación del impacto ambiental de proyectos de desarrollo*, *62*(1): 4937-4955. Recuperado de http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v62n1/a19v62n1.pdf

Siles, J., y Gutiérrez, I. (2012). Fortalecimiento de los grupos locales: un análisis a partir de los capitales de la comunidad. *Recursos Naturales y Ambiente*, 59-60.

Torrellas, M., Antón, A., Montero, J., Baeza, E., López, J., y Pérez, J. (2011). Estudio del impacto ambiental del cultivo de tomate en un invernadero multitúnel. *Horticultura global,* (294), 22-29.

Universidad del Tolima (2003). *Proyecto educativo institucional con énfasis en gestión sostenible de cuencas hidrográficas en el cañón del Combeima.* (J. Lozano y U. Pérez, Eds.). Ibagué: Editorial Atlas.

Villegas, J. (2002). Desarrollo sostenible, capital social y municipio. *Provincia, 9*(1), 55-68.

Sección IV

Servicios ecosistémicos aportados por los sistemas de producción agropecuarios

6

Potencial de adaptación al cambio climático de sistemas de uso del suelo en la cuenca media de río Combeima (Ibagué, Colombia)

Hernán J. Andrade C.[1,2*]; Milena A. Segura M.[1,3]; María del Pilar Marín Quintero[1]; Diana Skarly Canal Daza[1]; Erika Sierra Ramírez[1]; Luis Miguel Acuña Simbaqueva[1]; Oscar Izquierdo[1,4]

Resumen

Se estimó el potencial de adaptación al cambio climático teniendo en cuenta la diversidad florística y la biomasa de leñosas perennes y necromasa en bosques, sistemas agroforestales (SAF), café en monocultivo, pasturas de corte, cultivos perennes y cultivos transitorios en fincas aledañas a la cuenca media del río Combeima (Tolima, Colombia). Se establecieron en cada sistema cinco repeticiones, se usaron modelos alométricos para estimar tanto la biomasa aérea como abajo del suelo, índices de diversidad, índice de valor de importancia de las especies arbóreas, y medición de carbono almacenado en la hojarasca (necromasa). El sistema de bosque almacenó mayor cantidad de carbono arriba y abajo del suelo (65,5 ± 31,8 y 12,2 ± 5,2 t/ha), en comparación con los SAF de café y en el monocultivo, presentando en este último el valor más bajo (1,4 ± 0,2 y 0,4 ± 0,1 t/ha). El carbono almacenado en la necromasa no presentó diferencias significativas entre los sistemas de bosque y café, pero sí con los demás sistemas. Las variables seleccionadas mostraron que al cultivar árboles o plantar cultivos leñosos se incrementa el potencial de adaptación al cambio climático. El diseño de los SAF es una alternativa para la acumulación de biomasa y la generación de servicios ambientales a los habitantes de la zona. Sin embargo, falta ejecución de políticas que integren estrategias de adaptación y mitigación del cambio climático mediante el incremento de la biomasa en bosques y cultivos asociados con árboles, para luego implementarlos junto con los pobladores de esta región.

Palabras clave: biomasa, diversidad, hojarasca, sistemas agroforestales.

1 Grupo de Investigación "Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales" (Proecut), Universidad del Tolima.
2 Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad del Tolima.
3 Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.
4 Universidad Autónoma de Chapingo, México.
* Autor para correspondencia, correo electrónico: hjandrade@ut.edu.co

Abstract

It was estimated the potential for adaptation to climate change considering floristic diversity and carbon storage in biomass and necromass in forests, agroforestry systems (AFS), coffee monocultures, cut and carry pastures, bean crops and perennial crops on farms adjacent to the middle basin of the Combeima River, Tolima, Colombia. Five replications were established in each system and allometric models were used to estimate both the above and belowground biomass, diversity indexes and importance value of tree species, and measurement of carbon stored in necromass. The forests stored more carbon above and belowground (65.5 ± 31.8 and 12.2 ± 5.2 t/ha), compared to the coffee AFS and monocultures, presenting in this latter the lowest value (1.4 ± 0.2 and 0.4 ± 0.1 t/ha). The carbon storage in the necromass did not present significant differences between forests and coffee systems, but it did with the other systems. The variables selected showed that when growing trees or planting woody perennial plants, the potential of climate change adaptation is increased. The design of AFS is an alternative for the carbon storage and generation of environmental services for the inhabitants of the area. However, there is a lack of implementation of policies that integrate strategies for adaptation and mitigation of climate change by increasing biomass in forests and crops associated with trees, and then implement them with the people of this region.

Keywords: biomass, diversity, litter, agroforestry systems.

6.1. Introducción

El incremento de la temperatura y alteraciones en los patrones de precipitación, que vienen ligados al cambio climático, distorsionarán gravemente el potencial de la producción de cultivos, sobre todo de aquellos establecidos en ladera, como muchos cafetales y cacaotales (Lau *et al.,* 2011). En este contexto, la adaptación de los sistemas de uso del suelo ha sido reconocida como estrategia internacionalmente aceptada para afrontar el cambio climático (Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC], 2014). Se entiende como adaptación al ajuste de los sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos reales o esperados, lo cual atenúa los efectos perjudiciales o explota las oportunidades benéficas (IPCC, 2007). En sistemas de uso del suelo, la diversidad de especies arbóreas y el *stock* de biomasa y necromasa pueden considerarse indicadores del grado de adaptación al cambio climático (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2010; Monterroso *et al.*, 2012; Andrade *et al.,* 2016b; Acevedo *et al.,* 2017).

La efectividad en las estrategias de adaptación se relaciona con la capacidad de alcanzar los objetivos planteados, ya sea reduciendo el impacto y exposición o mitigando el riesgo, evitando el peligro o promoviendo la seguridad (Jones, 2001). La adaptación al cambio climático ha sido evaluada desde cuatro áreas: política, de gestión de conocimientos o información, ecosistémica y social (Brenes *et al.,* 2014). Dentro de la capacidad ecosistémica la diversidad vegetal se considera un indicador, ya que el uso de múltiples especies a menudo exhibe mayor resiliencia al cambio climático, tal como afirman Mawdsley *et al.* (2009) y Magrin (2015). Estos mismos autores argumentan que otra estrategia de adaptación puede ser el mejorar la matriz del paisaje, incrementando la movilidad de especies entre sistemas de uso del suelo. Asimismo, la biomasa y la cobertura de suelo, en términos de cantidad de hojarasca, son servicios ecosistémicos y podrían también indicar la capacidad de adaptación de los sistemas de uso del suelo al cambio climático (Gitay *et al.,* 2001).

Colombia cuenta con alta biodiversidad, ya que se tienen registros cercanos a las 26 500 especies de plantas con flores, mayormente concentradas en la región Andina (Rangel, 2015). Además, los bosques son indispensables para la mitigación y adaptación al cambio climático porque fijan carbono atmosférico en biomasa, necromasa y suelos (Andrade *et al.,* 2016a; Andrade *et al.,* 2017), regulan el ciclo de agua, protegen los suelos, contribuyen a regular el clima, y son fuente de muchos recursos como madera, alimentos, fibra y materiales de construcción para el consumo doméstico e industrial (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable [MADS], 2016). Aunque el departamento del Tolima no tiene gran vocación forestal, contaba en el 2013 con 362 000 ha de bosques, el 0,6% de las existentes en el país (Galindo *et al.,* 2014).

Colombia es una de las naciones que ha realizado la adaptación basada en ecosistemas (ABE) con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la agricultura y los recursos hídricos (Magrin, 2015). Sin embargo, no han sido generalizadas estas estrategias en la población. Los actuales modelos de desarrollo implementados en la cuenca del río Combeima son inviables desde el punto de vista ecológico y social (Hernández & Benavides, 2013). Se ha estimado que en la ciudad existe disponibilidad de pagar por el mejoramiento del suministro de agua para promover usos de la tierra amigables con el agua (Segura & Andrade, 2017). En ese sentido, este estudio estima el potencial de adaptación al cambio climático, empleando indicadores, de los sistemas de uso del suelo más dominantes en la cuenca media del río Combeima (Ibagué, Tolima, Colombia). Los resultados serán un insumo útil a los técnicos y tomadores de decisiones para el desarrollo y fomento de técnicas y políticas que incentiven el uso de sistemas mejor adaptados al cambio climático.

6.2 Materiales y métodos

6.2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el corregimiento Villa Restrepo, entre las veredas El Resbalón y El Brillante, pertenecientes a la microcuenca La Plata, la cual hace parte de la cuenca del río Combeima. El área se encuentra localizada entre los 04^0 31’ 06,7” - 04^0 31’ 14,4” N y 75^0 17’ 29,1” - 75^0 17’ 54,6” O (Figura 22) y presenta una precipitación promedio anual de 1816 mm y una temperatura promedio de 17 °C, correspondiente a bosque húmedo premontano (bh-PM) según Holdridge (1996). La población que habita la zona se aproxima a los 1071 habitantes, con variaciones temporales por la actividad turística debida a la riqueza natural y la gran belleza escénica para el disfrute de los ibaguereños y visitantes (Hernández & Ramírez, 2016; Ospina *et al.,* 2016).

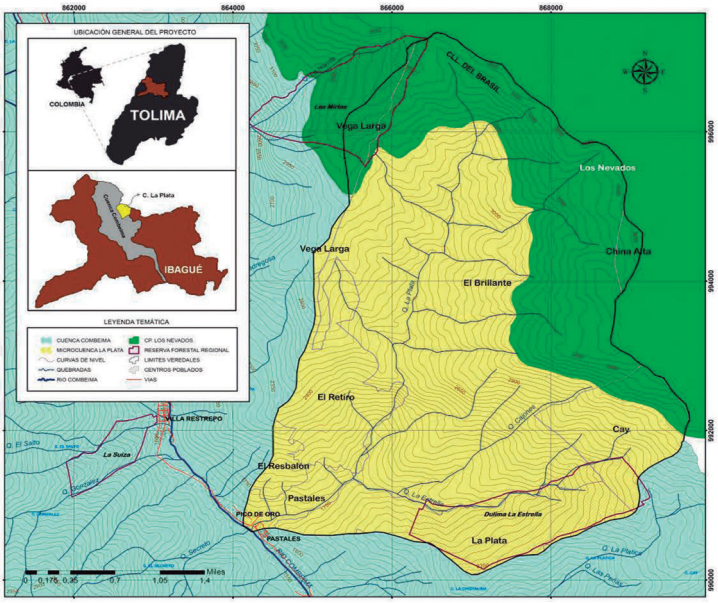

Figura 22. Ubicación geográfica de la microcuenca La Plata (Tolima, Colombia).
(Tomado de Guauque y Barreto, 2017).

El paisaje fisiográfico de la cuenca del río Combeima se caracteriza por tener profundos valles de laderas abruptas de montaña, donde se diferencian cinco etapas de desarrollo y evolución asociadas con su estructura (Cuéllar *et al*., 2014). Esta cuenca beneficia a los habitantes de Ibagué al proveer 1860 l/s de agua, lo cual la convierte en la principal fuente de abastecimiento del líqui-

do vital para el acueducto del municipio (Ospina *et al.,* 2016); también provee alimentos gracias a las actividades agropecuarias que se desarrollan, principalmente cultivos perennes —café, mora y granadilla— y transitorios —arveja, fríjol y maíz— (ver capítulo 2).

6.2.2. Diseño de muestreo

Se identificaron seis sistemas de uso del suelo en la zona de estudio: café en monocultivo, sistema agroforestal (SAF) con café, bosques remanentes, pasturas de corte, cultivos perennes —mora y granadilla— y cultivos transitorios —fríjol— en fincas de productores (Figura 23). Estos sistemas fueron los más dominantes del área (ver capítulo 2). En cada sistema de uso del suelo se establecieron cinco repeticiones, excepto para los cultivos perennes, en los cuales se evaluó en seis repeticiones.

Figura 23. Sistemas de uso de suelo evaluados: cultivo de granadilla (izquierda), cultivo de café (derecha), en la microcuenca La Plata (Tolima, Colombia).

En cada repetición se estableció una parcela temporal de muestreo (PTM) de 600 m^2 para medir la altura total y el diámetro del tronco a la altura del pecho (dap) de todos los árboles, con un dap ≥ 10 cm y una PTM de 100 m^2 para medir el diámetro del tronco a una altura de 15 cm (D_{15}), y la altura total de todas las plantas de café (*Coffea arabica* L.). La identificación taxonómica de las familias y especies fue realizada en campo y confirmada en la base de datos de *The Plant List* (2013).

6.2.3. Diversidad florística

La composición de árboles en los bosques (Figura 24) y SAF con café fue analizada con base en la abundancia y el índice de valor de importancia (IVI), tomado como la sumatoria de los valores relativos de la frecuencia, abundancia y dominancia por especie en cada PTM (Curtis & McIntosh, 1951). Adicionalmente, se estimó la riqueza de especies y la diversidad alfa empleando los índices de diversidad de Shannon-Wiener (H´), Simpson y Margalef.

Figura 24. Bosque en la microcuenca La Plata (Ibagué, Tolima, Colombia).

6.2.4. Stock de biomasa y necromasa

La biomasa arriba del suelo se estimó empleando modelos alométricos específicos por especie o grupos de especies o generales recomendados por diversos autores para la misma zona de vida (Tabla 17). La densidad de la madera fue consultada en la base de datos *The Global Wood Density* y en los documentos de Chave *et al.* (2009) y Zanne *et al.* (2009). La biomasa abajo del suelo se estimó empleando el modelo propuesto por Cairns *et al.* (1997) y recomendado por el IPCC (Tabla 17), que emplea como variable independiente la biomasa arriba del suelo.

La estimación de la necromasa se realizó mediante la recolección de todo el material vegetal muerto sobre el suelo en cuatro marcos de 0,5 × 0,5 m

distribuidos en cada PTM principal, donde se midieron los árboles (Figura 25). Este material colectado fue pesado en fresco y de cada muestra se seleccionó un aproximado de 250 g para luego secar a 60 °C hasta obtener peso constante. El porcentaje de materia seca se empleó para transformar valores de peso fresco a peso seco o materia seca.

Figura 25. Método para la estimación de materia seca en hojarasca, en sistemas de uso del suelo en la microcuenca de La Plata (Ibagué, Tolima, Colombia).

6.2.5. Análisis estadístico

La estimación de los índices de diversidad se realizó a través del programa *Past* (versión 2,17). Adicional a ello, se hizo un análisis de varianza mediante la prueba de Kruskal-Wallis para la abundancia absoluta y el área basal. Los datos de la biomasa se estudiaron con un análisis de varianza previo al cumplimiento de los supuestos estadísticos. En caso de presentarse diferencias estadísticas entre tratamientos o sistemas de uso del suelo se efectuó la prueba de diferencia de medias de LSD Fisher. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el software *InfoStat* (versión 2008). El potencial de la capacidad de adaptación al cambio climático de los sistemas de uso del suelo se determinó con el empleo de siete indicadores: abundancia y riqueza de especies, índices de Shannon-Wiener, Simpson, Margalef, biomasa total y materia seca de la hojarasca. Los valores del promedio de cada indicador por uso del suelo se convirtieron a un índice utilizando la escala de Likert (1932) de 0 a 1.

Tabla 17
Ecuaciones alométricas empleadas para estimar la biomasa arriba por individuo y abajo del suelo de acuerdo a especie o grupo de especies o zona de vida

Especie/grupo de especies	Modelo	Fuente
Coffea arabica	$B= \exp^{(-1,92+0,95*\ln(D15)+1,42*\ln(ht)}$	Andrade *et al.* (2016b)
Cedrela odorata	$B= 94,995-5,553*dap+ 0,737*dap^2$	Rueda *et al.* (2014)
Cordia alliodora	$B= 10^{(-0,51+2,08*\log(dap))}$	Andrade *et al.* (2008)
Guadua angustifolia	$B= 2,231*dap^{1,059}$	Rojas *et al.* (2013)
Frutales (*Psidium guajava*, *Citrus* spp, *Persea americana)*	$B= 10^{(-1,12+2,62*\log(dap)+0,03*\log(ht))}$	Segura (2005)
Multiespecie	$B=\exp(-2,22+2,08*\ln(dap)+0,59*\ln(ht)+1,09*\ln(p))$	Álvarez *et al.* (2012)
Multiespecie	$Br= \exp^{(-1,059+0,884*\ln(Ba))}$	Cairns *et al.* (1997)

B: biomasa arriba del suelo (kg/planta); dap: diámetro a la altura del pecho (cm); ht: altura total (m); D15: diámetro a 15 cm de altura; p: densidad de la madera (g/cm^3); Br: biomasa abajo del suelo (t/ha); Ba: biomasa arriba del suelo (t/ha).

6.3. Resultados y discusión

6.3.1. Composición florística

En el bosque se encontró una abundancia de 266,7 ± 11,8 individuos/ha con un dap ≥ 10 cm (Tabla 18). Se identificaron 18 especies arbóreas de 12 familias en un esfuerzo de muestreo de 0,3 ha (Tabla 18), siendo las familias botánicas con mayor abundancia: *Leguminosae, Urticaceae* y *Boraginaceae* (70, 44 y 37 individuos/ha, respectivamente); mientras que las familias con mayor número de especies son *Leguminosae* y *Urticaceae* (4 y 2 especies, respectivamente). Las demás familias estaban representadas por una sola especie. En contraste, en el SAF-café se encontraron 70,0 ± 23,2 individuos/ha, distribuidos en 9 especies. La mayor abundancia (40 individuos/ha) se registró en la especie *Cecropia angustifolia*. Se hallaron diferencias significativas en la abundancia entre el bosque y el SAF-café ($p < 0,01$), al igual que en el área basal entre estos sistemas ($p = 0,0159$) (Tabla 18).

Tabla 18
Abundancia, área basal y riqueza de especies arbóreas en bosques y sistemas agroforestales con café en la microcuenca de La Plata, en la cuenca media del río Combeima (Ibagué, Colombia)

Sistema de uso del suelo	Abundancia (individuos/ha)	Área basal (m^2/ha)	Riqueza de especies*
Bosque	266,7 ± 11,8 a	17,2 ± 6,4 a	18
SAF-café	70,0 ± 23,2 b	2,5 ± 1,0 b	9

SAF: sistemas agroforestales. Valores presentados corresponden a la media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$). * Riqueza de especies en un esfuerzo de muestreo de 0,3 ha.

Cascante y Estrada (2001) afirman que la familia *Leguminosae* presenta la mayor diversidad de especies, al igual que este estudio, en un bosque húmedo premontano en el valle central en Costa Rica. Comparado con otros estudios en este tipo de bosques de Colombia (Ariza *et al.,* 2009; Tinoco *et al.,* 2014), la diversidad en los bosques de la microcuenca de La Plata es baja, lo cual pone en evidencia el intenso proceso de fragmentación y pérdida de cobertura. Ello es una razón importante para gestionar la educación ambiental y la planeación con la comunidad a fin de mejorar los ecosistemas de la zona.

El bosque presentó mayor diversidad que los SAF con café, tal como era esperado. Los índices de diversidad de Shannon-Wiener (H´), de Simpson y de Margalef demostraron la mayor diversidad en el ecosistema boscoso en comparación con los cafetales con árboles (2,6 *vs.* 1,6; 0,9 *vs.* 0,6 y 3,9 *vs.* 2,6, respectivamente). Las especies más importantes desde el punto de vista ecológico, de acuerdo al IVI, fueron *Fraxinus chinensis*, *Cordia alliodora* y *Cecropia angustifolia* (16,8; 11,4; 10,0%, respectivamente) en el bosque, y *C. angustifolia* y *Ficus elastica* (62,6; 7,9%, respectivamente) en el SAF-café (Figura 26).

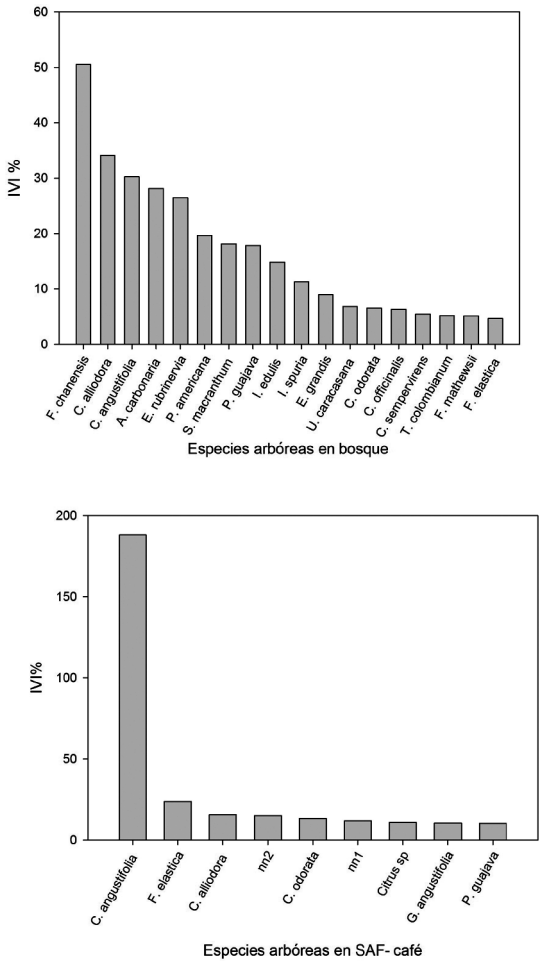

Figura 26. Índice de valor de importancia de la vegetación arbórea presente en bosques y en sistemas agroforestales con café (SAF-café) en la microcuenca La Plata (Ibagué, Tolima, Colombia). Albcar: *Albizia carbonaria*; Cecang: *Cecropia angustifolia*; Cedodo: *Cedrela odorata*; Chioff: *Chinchona officinalis*; Citsp: *Citrus* sp; Corall: *Cordia alliodora*; Cupsem: *Cupressus sempervirens*; Eryrub: *Erythrina rubrinervia*; Eucgra: *Eucalyptus grandis*; Ficela: *Ficus elastica*; Ficmat: *Ficus mathewsii*; Fracha: *Fraxinus chinensis*; Guaang: *Guadua angustifolia*; Ingedu: *Inga edulis*; Perame: *Persea americana*; Psigua: *Psidium guajava*; Solmac: *Solanum macranthum*; Tricol: *Trichospermum colombianum*; Urecar: *Urera caracasana*.

6.3.2. Stock de biomasa arbórea y hojarasca

De los sistemas evaluados, la mayor biomasa fue encontrada en el bosque, la cual fue superior estadísticamente a los cafetales en SAF y en monocultivo: 131,0 ± 63,5 y 24,3 ± 10,4 *vs.* 12,8 ± 4,5 y 3,5 ± 1,1 *vs.* 2,8 ± 0,5 y 0,9 ±0,1 t/ha

para arriba y abajo del suelo en bosques, cafetales en SAF y café en monocultivo, respectivamente) (Figura 27). Los resultados concuerdan bastante con los estimados de Phillips *et al.* (2011) para este tipo de bosque en Colombia (114,1 t/ha en biomasa arriba del suelo); sin embargo, resultan muy inferiores a los hallazgos de Ulate (2011) en bosques primarios e intervenidos en Costa Rica (247,5 y 154,9 t/ha, respectivamente). Este último autor ratificó que la biomasa arriba del suelo en bosques secundarios depende de su edad: 87,0; 130,5 y 21,9 t/ha para estos ecosistemas en edad tardía mayor de 20 años, de 5-20 años y temprano de 2-5 años, respectivamente. Los valores contrastantes se relacionan con la abundancia absoluta de árboles, lo cual a su vez se afecta por el tiempo e intensidad de intervención del bosque. Los bajos valores en los bosques indican que es urgente tomar medidas eficaces para que los pobladores locales tengan acceso a madera, leña y tutores de sistemas de uso del suelo diferentes a los bosques naturales, tal como cercas vivas y otros SAF.

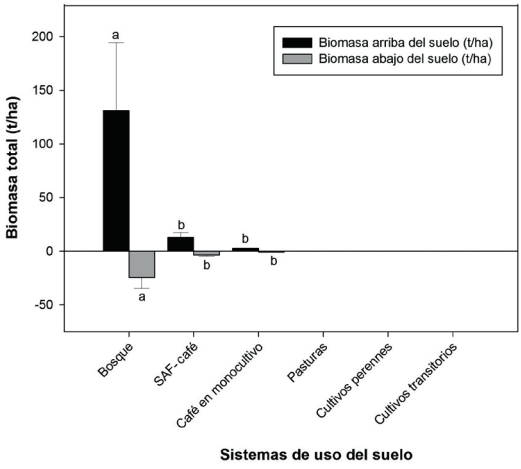

Figura 27. Biomasa arriba y abajo del suelo en los usos del suelo dominantes en la microcuenca de la Plata (Ibagué, Colombia). Los valores indican las medias ± error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre sistemas de uso del suelo.

La composición del dosel de sombra es un elemento clave para la dinámica de la biomasa en SAF con café. Así, Kürsten y Burschel (1993) hallaron que la biomasa total en los SAF-café en Costa Rica presentó un rango grande, pero superior a lo calculado en este estudio (28-104 t/ha). En Colombia, Andrade *et al.* (2014) encontraron que los cafetales en SAF con *Cordia alliodora* o *Hevea brasiliensis* o en monocultivo presentaron mayor biomasa arriba que los hallazgos de este estudio (73,4; 45,8; 4,4 t/ha, respectivamente), a diferencia del SAF-café con plátano, que presentó la menor

biomasa (2,6 t/ha). Los resultados se pueden atribuir a la nula o baja densidad de árboles asociados a los cafetos, dado principalmente por un bajo brillo solar, lo que limitaría la sombra que puede ser proporcionada por los árboles (Somarriba, 2002). Un cambio en el diseño de estos sistemas de producción, incluyendo la sombra de árboles, es factible para el departamento del Tolima (Andrade *et al.,* 2013; Andrade & Segura, 2016c) y causaría un incremento en el *stock* de biomasa (Andrade *et al*., 2014; Vega *et al.,* 2014; Magrin, 2015).

La hojarasca presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre sistemas de uso del suelo, así los bosques y cafetales en monocultivo presentaron mayor materia seca en este componente (2,9 ± 0,6 y 2,9 ± 0,5 t/ha, respectivamente) que los SAF con café, las pasturas de corte y los cultivos perennes (1,9 ± 0,3; 1,4 ± 0,3 y 1,3 ± 0,2 t/ha, respectivamente), siendo el valor más bajo en cultivos transitorios (0,7 ± 0,7 t/ha) (Figura 28). En contraste, los sistemas de café asociados con *C. alliodora* o *E. poepigiana* pueden almacenar en la hojarasca 4,9 y 6,3 t/ha, respectivamente (Fassbender, 1993). La hojarasca es clave para el manejo sostenible de los sistemas de producción, ya que presenta varias ventajas productivas y ambientales, tales como disminuir la erosión hídrica (Díaz, 2009), incrementar la infiltración (Sánchez *et al.,* 2015), mejorar la estructura del suelo (Martínez *et al.,* 2008) y su disponibilidad de agua, mejorar el ciclaje de nutrientes (Morales *et al.,* 2016) e incrementar la biodiversidad (Gelvez, 2008; Salazar, 2008).

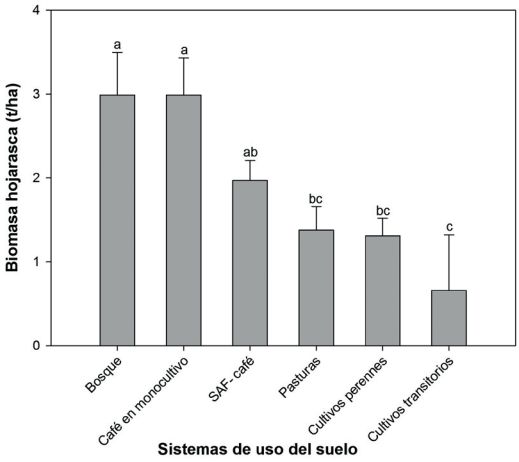

Figura 28. Materia seca en hojarasca en los usos del suelo dominantes en la microcuenca de La Plata (Ibagué, Colombia). SAF: sistemas agroforestales. Los valores indican las medias ± error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre sistemas de uso del suelo.

6.3.3. Adaptación al cambio climático

Los bosques naturales, considerados como el control o testigo positivo de este estudio, presentaron el mayor potencial de adaptación al cambio climático, al lograr el máximo valor en los índices estudiados (Figura 29). En el otro extremo, los cultivos transitorios y el café en monocultivo poseen el menor grado de adaptación al cambio climático, al tener en cero casi todos los indicadores, incluyendo la hojarasca (Figura 29). Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de mejorar la cobertura del suelo, ya sea con hojarasca como se observa en este estudio, o con coberturas nobles.

Los SAF-café, de acuerdo con los resultados, presentan un potencial de adaptación medio, y podrían ser una estrategia de adaptación de cultivos, principalmente en ladera. Estos sistemas de producción permiten mantener algunas de las características deseables de los bosques naturales, como alta diversidad florística, estructura con diversos estratos vegetales y sus múltiples interacciones ecológicas. Además, los SAF pueden contribuir a la conservación de la diversidad en la zona cafetera colombiana al suplir los requerimientos energéticos y de materias primas (Farfán, 2014).

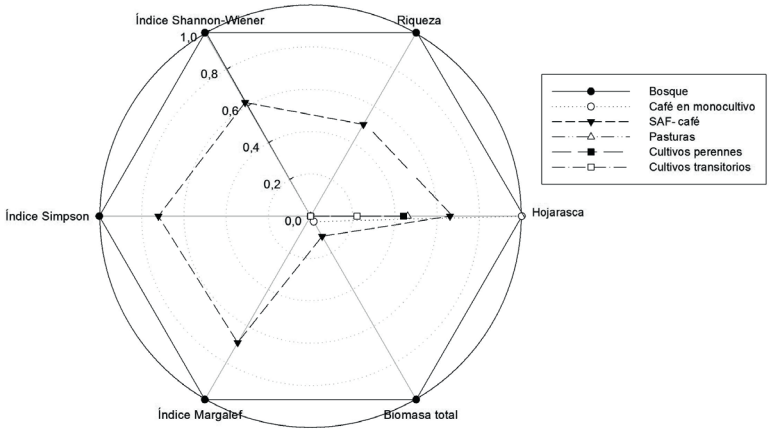

Figura 29. Indicador local de la capacidad de adaptación de los sistemas de uso del suelo en la cuenca media del río Combeima (Ibagué). El límite del círculo es definido como el máximo valor posible en cada variable. SAF: sistemas agroforestales.

Un indicador del potencial de adaptación al cambio climático ideal parece ser la necromasa (Comisión Europea, 2009; Morales *et al*., 2016). Esto debido a que los agricultores alteran constamente el suelo y, específicamente, en el área de estudio se ha encontrado que la etapa del manejo de cultivos más

agresiva es la preparación del terreno, ya que reduce la cobertura vegetal y la captura de carbono, reduciendo su baja resiliencia ambiental (Guauque & Barreto, 2017). Acevedo *et al.* (2017) encontraron que indicadores como la conservación del agua, la arborización y la participación de la comunidad en red mejoran la adaptabilidad y, por ende, el aumento de la sustentabilidad y la disminución de la vulnerabilidad, aunque estos autores afirman que es necesario realizar mayores investigaciones a largo plazo para integrar indicadores de diferentes áreas.

Por otro lado, la actual ordenación del paisaje del cañón del Combeima parece no ser la más adecuada, ya que se han encontrado desigualdades sociales, fragmentación ecosistémica y homogeneización en los procesos económicos productivos. En este sentido, el manejo y diseño de los sistemas de producción debe estar encaminado a mejorar estos y otros indicadores de adaptación al cambio climático de manera integrada.

6.4. Conclusiones

Los bosques y los cafetales en SAF y monocultivo resultaron ser, en su orden, los sistemas de uso del suelo con mayor potencial de adaptación al cambio climático. En este sentido, los SAF parecen ser una alternativa que permite incrementar el potencial de adaptación al cambio climático en los sistemas de producción agropecuarios. El dosel de sombra en los cafetales incrementó notablemente su diversidad florística, la abundancia arbórea y el *stock* de biomasa y hojarasca. En los SAF se pudo conservar una de las especies arbóreas de mayor importancia ecológica en los bosques (*Cecropia angustifolia*), lo cual indica su relevancia ecológica y ambiental y su potencialidad para funcionar en zonas de amortiguamiento de áreas protegidas o fragmentos de bosque.

El manejo de la cobertura de suelos fomentando el *stock* de necromasa es una estrategia importante para mejorar la adaptación al cambio climático de sistemas de producción agropecuarios. Los sistemas a suelo desnudo por lo común presentan perjuicios productivos y ambientales al reducir los nutrientes disponibles en el suelo y acarrear grandes cantidades de sedimentos a los cuerpos de agua.

Los tomadores de decisiones deben afrontar su papel en la protección ambiental, sobre todo de las cuencas hidrográficas, formulando políticas y programas que incentiven a los productores a manejar sistemas de producción más adaptados al cambio climático. Otra estrategia para fomentar estas prácticas es el desarrollo de programas de pago por servicios ambientales que involucren las sinergias mitigación-adaptación del cambio climático.

6.5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la comunidad de la cuenca media del río Combeima por la participación en el estudio; a la Oficina Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima por la financiación del proyecto con código 290113, y a los demás integrantes de los grupos de investigación aliados (Cuencas Hidrográficas, Sistemas Agroforestales Pecuarios [SAFP], Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales [Gibdet]) por el apoyo en la medición y colección de datos en campo.

6.6. Referencias

Acevedo, Á. O., Angarita, A. L., León, M. V., y Franco, K. L. (2017). Sustentabilidad y variabilidad climática: acciones agroecológicas participativas de adaptación y resiliencia socioecológica en la región alto-andina colombiana. *Luna Azul*, *44*, 06-26.

Álvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., Salas, G., Valle, I.,... Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbón stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 267, 297-308.

Andrade, H. J., y Segura, M. A. (2016c). Dinámica de la sombra de *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales con café en Tolima, Colombia. *Agronomía Costarricense, 40*(2), 77-86.

Andrade, H. J., Marín, L. M., y Pachón, D. P. (2014). Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. *Bioagro, 26*(2), 127-132.

Andrade, H. J., Segura, M. A., y Feria, M. (2016b). Above-ground biomass models for coffee bushes (*Coffea arabica* L.) in Líbano, Tolima, Colombia. *Agroforestry Systems*, 1-12.

Andrade, H. J., Segura, M. A., y Rojas, A. S. (2016a). Carbono orgánico del suelo en bosques riparios, arrozales y pasturas en Piedras, Tolima, Colombia. *Agronomía Mesoamericana, 27*(2), 1-9.

Andrade, H. J., Segura, M. A., Canal, D. S., Gómez, M. J., Marín, M. P., Sierra, E., y Feria, M. (2013). *Estrategias de adaptación al cambio climático en sistemas de producción agrícola y forestal en el departamento del Tolima*. Ibagué: Universidad del Tolima.

Andrade, H. J., Segura, M. A., Canal, D. S., Huertas, A., y Mosos, C. (2017). Composición florística y conservación de carbono en bosques riparios

en paisajes agropecuarios de la zona seca del Tolima, Colombia. *Biología Tropical*, 65(4): 1245 - 1260.

Andrade, H. J., Segura, M. A., Somarriba, E., y Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 43, 45-50.

Ariza, W., Toro, J. L., y Lores, A. (2009). Análisis florístico y estructural de los bosques premontanos en el municipio de Amalfi (Antioquia, Colombia). *Colombia Forestal*, 12, 81-102.

Brenes, C., Cifuentes, M., y Medellín, C. (2014). Inventario y herramientas. Indicadores para planear y monitorear la capacidad adaptativa en América Latina ante el cambio climático. Recuperado de http://euroclima.org/images/Publicaciones/FlyersET/ ET2_flyer_FINALweb_es.pdf

Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., y Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world´s upland forests. *Oecologia,* 111, 1-11.

Cascante, A., y Estrada, A. (2001). Composición florística y estructura de un bosque húmedo premontano en el Valle Central de Costa Rica. *Rev. biol. trop, 49*(1), 213-225.

Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., y Zanne, A. E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters, 12*(4), 351-366.

Comisión Europea (2009). El papel de la naturaleza en el cambio climático. Recuperado de http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/Nature%20and%20Climate%20Change/Nature%20and%20Climate%20Change_ES.pdf

Cuéllar, M. A., López, J. A., Carrillo, E. J., Ibáñez, D. G., Sandoval, J. H., y Osorio, J. A. (2014). Control de la actividad tectónica sobre los procesos de erosión remontante: el caso de la cuenca del río Combeima, cordillera Central, Colombia. *Boletín de Geología, 36*(1), 37-56.

Curtis, J. T., y McIntosh, R. P. (1951). An Upland Forest Continuum in the Prairie-Forest Border Region of Wisconsin. *Ecology, 32*(3), 476-496.

Díaz, M. (2009). *Producción descomposición de hojarasca y macroinvertebrados fragmentadores en cuatro agroecosistemas de la cuenca del río La Vieja* (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

Farfán, F. (2014). *Agroforestería y sistemas agroforestales con café. Manizales, Caldas (Colombia)*. Manizales: Fondo Nacional del Café [FNC] – Centro Nacional de Investigaciones del Café [Cenicafé].

Fassbender, H. (1993). *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales.* Catie, Turrialba, Costa Rica.

Galindo, G., Espejo, O. J., Ramírez, J. P., Forero, C., Valbuena, C. A., Rubiano, J. C.,… Cabrera E. (2014). *Memoria técnica de la cuantificación de la superficie de bosque natural y deforestación a nivel nacional.* Actualización período 2012-2013. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam].

Gelvez, I. M. (2008). *Efecto del uso del suelo sobre la descomposición de hojarasca y grupos funcionales microbianos (cuenca del río La Vieja, Quindío)* (Trabajo de grado). Pontificia Universidad Javeriana.

Gitay, H., Brown, S., Easterling, W., Jallow, B., Antle, J., Apps, M. J.,… Soussana, J. (2001). Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. En J. J. McCarthy (Ed.), *Ecosystems and their goods and services* (pp. 235-342). Nueva York: Cambridge University Press.

Guauque, D. E., y Barreto, L. E. (2017). *Evaluación del impacto ambiental de los sistemas predominantes de producción agropecuaria en la microcuenca La Plata, Ibagué-Tolima* (Trabajo de grado). Universidad del Tolima.

Hernández, R., y Benavides, H. (2013). *Proyecto Axilium, cambios en la cobertura del suelo en la cuenca del río Combeima, Tolima-Colombia*. Recuperado de: http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/1295/axilium%20tesis%20pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hernández, Y., y Ramírez, H. (2016). Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca Cay, Ibagué, Tolima, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 26*(2), 111-128.

Holdridge, L. (1996). *Ecología basada en zonas de vida* (5.ª ed.). Colección Libros y Materiales Educativos/IICA, núm. 83. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Jones, R.N. (2001). An environmental risk assessment/management for climate change impact assessments. *Natural Hazards*, 23, 197-230.

Kürsten, E., y Burschel, P. (1993). CO2-Mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution,* 70, 533-544.

Lau, C., Jarvis, A., y Ramírez, J. (2011). CIAT. Políticas. *Síntesis*, 1. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

Likert, R. (1932). *A technique for measurement attitudes*. Nueva York: Archives of Psychology.

Magrin, G. O. (2015). *Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe [Cepal] y Unión Europea [UE]. Recuperado de http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39842/ S1501318_es.pdf;jsessionid=68F618DA0545FA52C28D3A7B41EC1760?sequence=1

Martínez, E., Fuentes, J. P., y Acevedo, H. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *R. C. Suelo Nutr. Veg., 8*(1), 68-96.

Mawdsley, J. R., O'Malley, R., y Ojima, D. S. (2009). A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conservation Biology, 23*(5), 1080-1089.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable [MADS] (2016). *Importancia de los bosques. Colombia, tercer país de la región en cobertura boscosa.* Recuperado el 29 de noviembre de 2016, de http://www.minambiente.gov.co/index.php/ component/content/article?id=1210:el-uso-sostenible-de-los-bosques-prioridad-de-minambiente-513

Monterroso, A., Conde, C., Gay, C., Gómez, J., y López, J. (2012). *Indicadores de vulnerabilidad y cambio climático en la agricultura de México.* México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Morales, S., Vivas, N. J., y Terán, V. F. (2016). Ganadería ecoeficiente y la adaptación al cambio climático. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial, 14*(1), 135-144.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2010). *La gestión de los bosques ante el cambio climático.* Recuperado de http://www.fao.org/docrep/014/i1960s/i1960s00.pdf

Ospina, O., García, G., Gordillo, J., y Tovar, K. (2016). Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el río Combeima (Ibagué, Colombia). *Ingeniería Solidaria, 12*(19), 19-36. doi: http://dx.doi.org/10.16925/ in.v12i19.1191

Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC] (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. R. K. Pachauri y A. Reisinger (Eds.). Ginebra: IPCC.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC] (2014). *Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas en el sitio web de la contribución del Grupo de trabajo II al*

Quinto Informe de Evaluación (GTII IE5) del IPCC. Recuperado de http://www.ipcc.ch/pdf/ assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf

Phillips, J. F., Duque, A. J., Yepes, A. P., Cabrera, K. R., García, M. C., Navarrete, D. A., Álvarez, E., y Cárdenas, D. (2011). *Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos.* Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales [Ideam].

Rangel, J. O. (2015). La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional. *Rev. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 39*(151), 176-200.

Rojas, R. A., Li, T., Lora, G., y Andersen, L. (2013). *A measurement of the carbon sequestration potential of* Guadua angustifolia *in the Carrasco National Park, Bolivia.* Development Research Working Paper Series 04/2013. Institute for Advance Development Studies, Bolivia.

Rueda, A., Gallegos, A., González, D., Ruiz, A., Benavides, J. D., López, E., y Acosta, M. (2014). Estimación de biomasa aérea en plantaciones de *Cedrela odorata* L. y *Swietenia macrophylla* King. *Revista mexicana de ciencias forestales, 5*(25), 8-17.

Salazar, S. (2008). *Estudio de procesos ecológicos para el desarrollo sostenible de castaño (Castanea sativa Mill.) de la sierra de Francia* (Tesis doctoral). Universidad de Salamanca.

Sánchez N, D., Pinilla, G., y Mancera, P. J. (2015). Efectos del uso del suelo en las propiedades edáficas y la escorrentía superficial, en una cuenca de la Orinoquia colombiana. *Colombia Forestal, 18*(2): 255-272.

Segura, M. (2005). *Estimación del carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica.* Informe final de consultoría. Turrialba, Costa Rica.

Segura, M., y Andrade, H. (2017). Valoración financiera del servicio ecosistémico de regulación hídrica en la cuenca alta del río Combeima. En J. Muñoz y A. Guío (Eds.), *Incentivo económico por compensación de servicios ecosistémicos para la cuenca alta del río Combeima (Ibagué, Colombia*) (pp. 177-204). Ibagué: Universidad del Tolima.

Somarriba, E. (2002). Estimación visual de la sombra en cacaotales y cafetales. *Agroforestería de las Américas, 9*(35-36): 86-94.

The Plant List (2013). *The Plant List*, versión 1.1. Recuperado el 26 de octubre de 2016, de http://www.theplantlist.org/

Tinoco, F., Barragán, B., y Esquivel, H. E. (2014). Efecto del tamaño en la estructura, composición y diversidad de bosques premontanos en la cuenca del río Negro, Cundinamarca. *Rev. Asoc. Col. Cienc. (Col.)*, 26, 49-58.

Ulate, C. A. (2011). *Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para Costa Rica* (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

Vega, G., Ordóñez, C. M., Suárez, J. C., López, C. F. (2014). Almacenamiento de carbono en arreglos agroforestales asociados con café (*Coffea arabica*) en el sur de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 5*(1), 213-221.

Zanne, A. E., López-González, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L.,… Chave, J. (2009). Data from: Towards a world-widewood economics spectrum. *Dryad Digital Repository,* doi:10.5061/ dryad.234.

7

Carbono orgánico del suelo en los usos del suelo predominantes en la microcuenca de La Plata (Ibagué, Tolima, Colombia)

Hernán J. Andrade C.[1,2*]; Milena A. Segura M.[1,3]; Erika Sierra Ramírez[1];
Diana Skarly Canal Daza[1]; Luis Miguel Acuña Simbaqueva[1]

Resumen

El carbono orgánico del suelo (COS) es afectado por el cambio de uso del suelo, que en caso de reducirse lleva al agotamiento de los servicios ecosistémicos debido a la continua degradación de sus funciones. El objetivo del estudio fue estimar el almacenamiento de COS en los principales usos del suelo y los impactos de potenciales cambios en la quebrada La Plata en Ibagué, Tolima, Colombia. Se evaluaron seis usos del suelo: i) sistemas agroforestales con café (SAF-C), ii) monocultivos de café (MC), iii) cultivos perennes (CP), iv) pastos de corte (P), v) fríjol (F), vi) bosque nativo (BN), estimando la densidad aparente (DA) por el método del cilindro y la concentración de COS a una profundidad de 0-30 cm. La DA más alta la presentaron los sistemas SAF-C, MC y BN en comparación con los sistemas de CP, P y F (1,5; 1,4; 1,3; 1,2, 1,2 y 1,2 g/cm^3, respectivamente). Contrastando, la concentración de COS no se redujo al comparar CP y las P (1,1 a 1,0%). Los SAF-C almacenaron el mayor COS que los MC, CP, B, F y P (45,3; 43,8; 39,3; 38,3; 38,1 y 37,4 t/ha, respectivamente). Los sistemas de uso del suelo sin cobertura arbórea afectan a lo largo del tiempo el COS; por ende, es importante investigar la dinámica de este servicio ambiental por cambios de uso del suelo.

Palabras clave: bosque nativo, cultivos agrícolas, densidad aparente, sistemas agroforestales.

1 Grupo de Investigación "Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales" (Proecut), Universidad del Tolima.
2 Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad del Tolima.
3 Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.
* Autor para correspondencia, correo electrónico: hjandrade@ut.edu.co

Abstract

The soil organic carbon (SOC) is affected by land use change that, in case of reduction, leads to the depletion of ecosystem services due to the continuous degradation of its functions. The objective of the study was to estimate the SOC stock in the main land uses, and the impacts of potential changes in the microbasin of La Plata in Ibagué, Tolima, Colombia. Five land uses were evaluated: i) agroforestry systems with coffee (AFS-C), ii) coffee monocultures (CM), iii) perennial crops (PC), iv) pastures for cutting (P), v) bean crops (B) and vi) native forests (NF), estimating the bulk density (BD) by the cylinder method and the concentration of COS at a depth of 0-30 cm. The highest BD was presented in AFS-C, CM and NF compared to PC, P and NF (1.5, 1.4, 1.3, 1.2, 1.2 and 1.2 g/cm^3, respectively). In contrast, the concentration of COS was not reduced when comparing PC and P (1.1 to 1.0%). The AFS-C stored the highest amount of SOC in comparison to CM, PC, NF, B and P (45.3, 43.8, 39.3, 38.3, 38.1 and 37.4 t/ha respectively). The land use systems tree cover affect the SOC over time, so it is important to research the dynamics of this environmental service by land use changes.

Keywords: native forests, agricultural crops, bulk density, agroforestry systems.

7.1. Introducción

Los cambios de uso del suelo ocasionan efectos sobre las propiedades físicas, químicas e hidrológicas de los suelos. Varios estudios en América (Orozco *et al.,* 2012; Morales *et al.,* 2016), y particularmente en Colombia (García *et al.,* 2012; Andrade *et al.,* 2016) sugieren que la deforestación o el pasar de una cobertura vegetal a suelo desnudo cambia drásticamente las características del suelo. La problemática generada se evidencia en la degradación de los bosques: en América latina y el Caribe, entre 1961 y 2011 la superficie agrícola aumentó 180 millones de hectáreas, cambiando en mayor medida en América del Sur (441-607 millones de hectáreas) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2017).

La degradación de suelos conlleva procesos de erosión, sellamiento de suelos, contaminación por agroquímicos, pérdida de materia orgánica, salinización, compactación y desertificación (FAO, 2002). La gestión insostenible de los suelos ha traído como consecuencia el aumento de la demanda de bienes y servicios, lo cual está ligado al desconocimiento de las funciones del suelo y de las alternativas de recuperación, restauración y rehabilitación. La desarti-

culación institucional y la carencia de normas que incrementan la vulnerabilidad de los suelos ante los efectos del cambio climático (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente], 2016) son otras situaciones que afectan negativamente a este recurso.

El estudio de las propiedades del suelo da cuenta de los impactos generados en este recurso por efectos del manejo (Estupiñán *et al.,* 2009). En particular, la densidad aparente (DA) y la concentración del carbono (C) orgánico del suelo (COS) permiten caracterizar y clasificar los suelos (Fassbender, 1993) y son requeridas para estimar el almacenamiento de COS. Según la FAO (2016), el suelo es el mayor sumidero de carbono en comparación con la vegetación y la atmósfera, pues se estima que su primer metro contiene cerca de 1,4 Pg C, valor que se incrementa a 2,5 Pg C al considerar los dos primeros metros. Esta cantidad de COS es clave para el ciclo global de este elemento y determina el potencial de mitigación del cambio climático (Alvarado *et al.,* 2013; Andrade *et al.,* 2016).

Aunque es clara la condición pobre del COS en América Latina y el Caribe (FAO, 2016), los estudios en zonas andinas son reducidos e incipientes (Andrade *et al.,* 2014), lo cual no arroja luces sobre su dinámica en el tiempo y por cambios de uso del suelo. En este contexto, se pretende estimar el almacenamiento de COS en los sistemas de uso del suelo predominantes en la cuenca media de la quebrada la Plata (Ibagué, Colombia). De la misma manera, se busca estimar el impacto potencial de fijar o emitir este gas a la atmósfera si se cambiara de uso del suelo, con el fin de promover la salud del suelo e impulsar la adaptación y mitigación del cambio climático.

7.2. Materiales y métodos

7.2.1. Área de estudio

Este estudio se realizó en la microcuenca La Plata, tributaria del río Combeima, localizado en Ibagué, departamento del Tolima (ver capítulo 3). El área se encuentra ubicada geoespacialmente entre los 04^{0} 31’ 06,7” - 04^{0} 31’ 14,4” N y 75^{0} 17’ 29,1” - 75^{0} 17’ 54,6” O, a una altitud aproximada de 1700-1860 m y se sitúa en un área clasificada como bosque húmedo premontano (bh-PM) (Holdridge, 1996). La zona presenta una temperatura promedio de 17 °C, con precipitación anual promedio de 1816 mm. El relieve va de muy quebrado a escarpado, con suelos que han evolucionado a partir de cenizas volcánicas con rocas andesita y cuarzodiorita (Alcaldía de Ibagué, 2013). El área es dominada por sistemas de producción de ganadería bovina y agricultura (Peláez & Santamaría, 2010; Riaño, 2014).

7.2.2. Diseño de muestreo

Se empleó un diseño experimental completamente al azar evaluando los seis usos del suelo más dominantes de la microcuenca La Plata (Figura 30): 1) sistemas agroforestales con café (SAF-C), 2) monocultivos de café (MC), 3) cultivos perennes (CP), los cuales incluyen granadilla y mora, 4) pastos de corte (P), 5) fríjol (F) y 6) bosques nativos (BN). Cada sistema de uso del suelo se repitió cinco veces para un total de treinta unidades de muestreo. El almacenamiento de COS se estimó a una profundidad de 0-30 cm, teniendo en cuenta la DA y la concentración de COS (Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC], 2003).

Figura 30. Estructura del paisaje predominante de las fincas en la microcuenca de La Plata (Ibagué, Colombia).

La DA se estimó tomando tres muestras por unidad de muestreo y empleando el método del cilindro (Andrade & Ibrahim, 2003; IPCC, 2003) (Figura 31), consistente en extraer la muestra de suelo con volumen conocido y secarla hasta peso constante (105 °C) en el Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad del Tolima. Posterior a ello, se empleó la siguiente ecuación.

$$Da = \frac{Pss}{Vc}$$

donde:

Da : Densidad aparente (g/cm^3)
Pss : Peso suelo seco (g)
Vc : Volumen interno del cilindro (cm^3)

Figura 31. Pasos metodológicos en la toma de muestras en campo para estimar la densidad aparente por el método del cilindro.

La concentración de COS se estimó tomando una muestra compuesta de 10 sub-muestras por unidad de muestreo, empleando el barreno helicoidal a una profundidad de 0-30 cm, según la metodología propuesta (MacDiken 1997; IPCC 2003) (Figura 32) y enviándolas al laboratorio de suelos LASEREX de la Universidad del Tolima para ser analizadas por el método de Walkley y Black (1934). La proporción de fragmentos gruesos (diámetro > 2 mm) fue despreciada ya que no superó el 5% en volumen (IPCC 2003). El almacenamiento de COS se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$COS = \%CO * Da * Ps$$

donde:

COS	:	Carbono orgánico en el suelo (t/ha)
%CO	:	Concentración de carbono orgánico (%)
Da	:	Densidad aparente (g/cm^3)
Ps	:	Profundidad del suelo (cm)

Figura 32. Barreno empleado en la toma de muestras de suelo para estimar la concentración del carbono orgánico del suelo (COS).

7.2.3. Impacto de potenciales cambios de uso del suelo en las existencias de COS

Los cambios en el almacenamiento de COS, causados eventualmente por alteraciones en el uso del suelo, se estimaron empleando el promedio de la DA de los BN y tomándolo como línea de base, de modo que las estimaciones se realizaron en función de una masa de suelo y no de un volumen (Ellert *et al.,* 2002; Mannetje *et al.,* 2008). Con estas estimaciones se construyó una matriz con la cual se simularon los cambios posibles entre los seis sistemas de uso del suelo estudiados estimando la diferencia en el almacenamiento de COS entre ellos (uso actual menos uso futuro). Estas diferencias fueron convertidas a CO_2 al multiplicar por 3,67 (IPCC, 2006), e indican emisiones de GEI en caso de ser negativas y captura neta de C si fuesen positivas.

7.2.4. Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza previa prueba de los supuestos estadísticos de los datos, al igual que pruebas comparativas de medias de Fisher (al 5%) en caso de detectar diferencias entre sistemas de uso del suelo en los análisis de varianza. Los análisis estadísticos fueron realizados con el programa InfoStat.

7.3. Resultados y discusión

7.3.1. Densidad aparente

La DA no mostró diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los sistemas de uso del suelo evaluados (Figura 33), siendo mayor en los SAF-C, MC y BN que en CP, P y F (1,5 ± 0,1; 1,4 ± 0,1; 1,3 ± 0,2; 1,2 ± 0,1; 1,2 ± 0,1 y 1,2 ± 0,1 g/cm^3, respectivamente). El estudio realizado por Alvarado *et al.* (2013) en sistemas de producción de café en el municipio del Líbano, Tolima, mostró una DA menor en monocultivo que en SAF con nogal (*Cordia alliodora*) (0,88 ± 0,03 y 0,92 ± 0,04 g/cm^3, respectivamente). Rojas *et al.* (2018) reporta incrementos significativos de la DA en los suelos manejados con pasturas asociado a árboles y cultivos agrícolas, respecto de aquellos que continúan bajo BN (0,65 y 0,61 *vs.* 0,35 g/cm^3, respectivamente). En otro estudio, Salamanca y Sadeghian (2004) encontraron una DA menor que la reportada en este trabajo para el cultivo del café, y afirman que en el caso de cafetales en Chinchiná el crecimiento óptimo del cultivo durante los primeros meses ocurrió con DA de 0,67 g/cm^3. Estos mismos autores sostienen que el crecimiento de los cafetos se vio afectado por altas DA y baja materia orgánica.

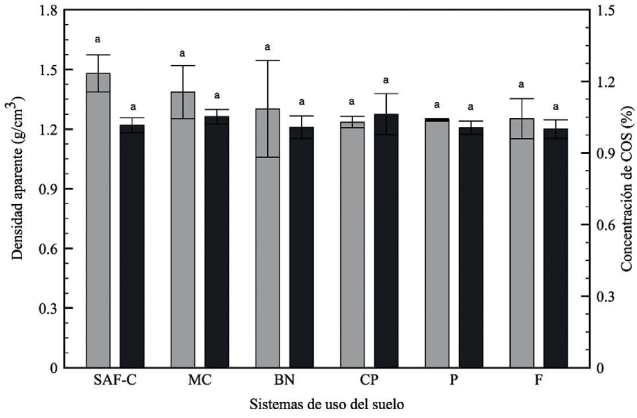

Figura 33. Densidad aparente y concentración de carbono orgánico del suelo (COS) en sistemas de uso del suelo predominantes en la parte media de la quebrada La Plata (Ibagué, Tolima, Colombia). Las barras de error corresponden a error estándar. Letras iguales indican que no existen diferencias estadísticas ($p > 0,05$) entre sistemas de uso del suelo.

Otros autores han encontrado resultados contrastantes en esta variable. Así, Jaurixje *et al.* (2013) encontraron que sistemas con manejo de suelo en cultivos de aguacate y pasto la DA fue menor comparados con aquellos suelos bajo cultivo de cebolla (1,33 y 1,34 *vs.* 1,43 g/cm^3, respectivamente). Este efecto

positivo en la salud del suelo puede ser atribuido al efecto de las raíces finas de la pastura y el tiempo de descanso del aguacate sobre las propiedades físicas del suelo. Las raíces finas al morir aportan carbono orgánico al suelo y dejan macroporos que reducen la DA (Andrade *et al*., 2008; Salamanca & Sadeghian, 2005; Andrade *et al.,* 2014; Beltrán & Erazo, 2017). De la misma forma, la reducción de la labranza permite mejorar las propiedades físicas del suelo, en este caso, la reducción de compactación, la cual está correlacionada con la DA (Muñoz *et al.,* 2014). Benavides *et al.* (2015) afirman que las perturbaciones antrópicas en suelos húmedos aumentan la DA a niveles superiores de 1,0 g/cm^3, debido al pisoteo de animales, maquinaria agrícola y alta compactación.

7.3.2. Concentración de carbono orgánico del suelo (COS)

No se detectaron diferencias significativas (p > 0,05) en la concentración de COS entre los sistemas de uso del suelo predominantes en la microcuenca de La Plata (Figura 33). La variación calculada estuvo entre 1,0% y 1,1% en los primeros 30 cm de profundidad. A pesar de no existir diferencias estadísticas (p > 0,05), se encontró que los sistemas de uso del suelo que incluyen componentes arbóreos, tales como CP, MC, SAF-C y BN, presentaron mayor concentración de COS (Figura 33). Zúñiga *et al.* (2013) reportan valores mayores en coberturas boscosas (1,8% en el parque de Los Nevados y 6,9% en el parque nacional Chingaza). Martínez *et al.* (2008) afirman que el C, además de su importancia en el rendimiento y la productividad, es esencial para mantener la micro- y la macrofauna edáfica, al existir relación directa entre el número de lombrices y el COS en diferentes sistemas de labranza. El COS resulta ser un excelente indicador de la salud o calidad de los suelos (Ferreras *et al.,* 2015).

No se detectó una clara relación entre la concentración de COS y la DA (Figura 34). Esto contrasta con los hallazgos de Alvarado *et al* (2013), Andrade *et al* (2014) y Andrade *et al* (2016), quienes reportan que al incrementarse el COS en el suelo se produce reducción en la DA, atribuido posiblemente a la acumulación de materia orgánica y formación de macroporos por senescencia de raíces finas. En este caso, la captura de COS podría estar asociada a dos servicios ecosistémicos muy importantes para la humanidad: la mitigación del cambio climático y el mejoramiento de suelos (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio [EEM], 2003; Orjuela *et al.,* 2014; Marín *et al.,* 2016).

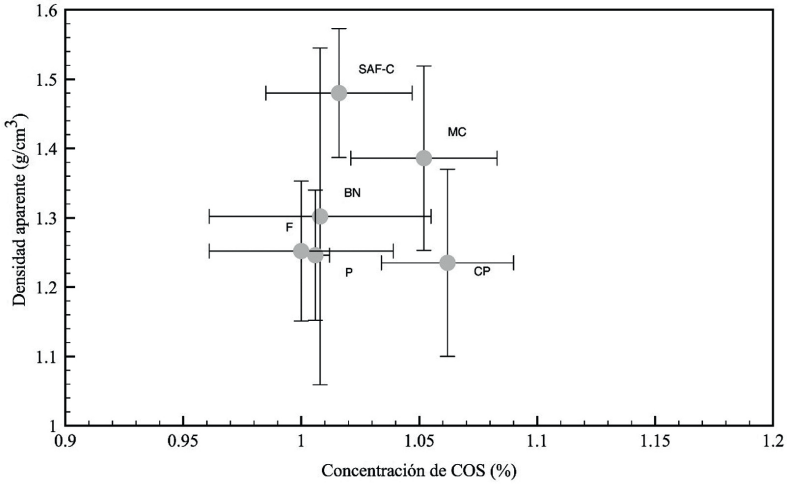

Figura 34. Relación entre la concentración de carbono orgánico del suelo (COS) y la densidad aparente (DA) a una profundidad de 0-30 cm en los sistemas de uso del suelo predominantes en la microcuenca de la quebrada La Plata (Ibagué, Colombia). SAF-C: sistemas agroforestales con café; MC: monocultivos de café; CP: cultivos perennes (granadilla - mora): P: pastos de corte; F: fríjol; B: bosques nativos. Las barras de error corresponden a error estándar.

7.3.3. Almacenamiento del COS

El almacenamiento de COS no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) a una profundidad entre 0 y 30 cm en los sistemas evaluados (Figura 35). Sin embargo, se detectó tendencia de mayor almacenamiento de COS en sistemas que incluyen leñosas perennes, tal como BN, CP, MC y SAF-C, los cuales superaron a los P y F (38,2 ± 5,1 *vs.* 39,2 ± 4,1 *vs.* 43,7 ± 4,3 *vs.* 45,2 ± 3,5 *vs.* 37,3 ± 2,6 *vs.* 38,0 ± 4,5 t/ha, respectivamente). Los SAF-C alcanzaron más COS que los MC (45,3 ± 3,5 y 43,7 ± 4,3 t/ha, respectivamente) (Figura 35). Los resultados de otros autores no permiten distinguir una clara tendencia en este servicio ecosistémico; por ejemplo, Alvarado *et al.* (2013) encontraron resultados opuestos en el Líbano (Tolima, Colombia), ya que en SAF de café asociado con nogal (*Cordia alliodora*) se presentaron menores existencias de COS que en los monocultivos de esta especie (50 *vs.* 54 t/ha, respectivamente).

Comparando los hallazgos en pasturas con otras investigaciones, no se puede establecer una clara tendencia. Andrade *et al.* (2014) estimaron valores prácticamente similares a los hallazgos de este estudio en el páramo de Anaime (22,0-34,4 t/ha); mientras que Ibrahim *et al.* (2007) reportaron cantidades mucho menores de COS en pasturas degradadas en Costa Rica. El estudio realizado por Alvarado *et al.* (2013) en sistemas de producción de café en el municipio del Líbano, Tolima, encontraron *stocks* de COS de 52,8

y 49,9 t C/ha en sistemas de producción de café asociado a plátano y nogal cafetero, respectivamente. En sistemas de producción agrícolas, Carvajal *et al.* (2009) y Montes *et al.* (2017) calcularon existencias de COS levemente superiores en cultivos agrícolas y de papa del páramo de Sumapaz (Colombia) (119,3 t/ha). En bosques nativos en otras regiones de Colombia, Zúñiga *et al.* (2013) reportaron valores muy superiores (107,7 y 137,5 t/ha de COS) en los parques nacionales Los Nevados y Chingaza respectivamente, pero contrastan con los valores inferiores reportados en bosques nativos de Anaime (21,6 t/ha) (Andrade *et al.,* 2014).

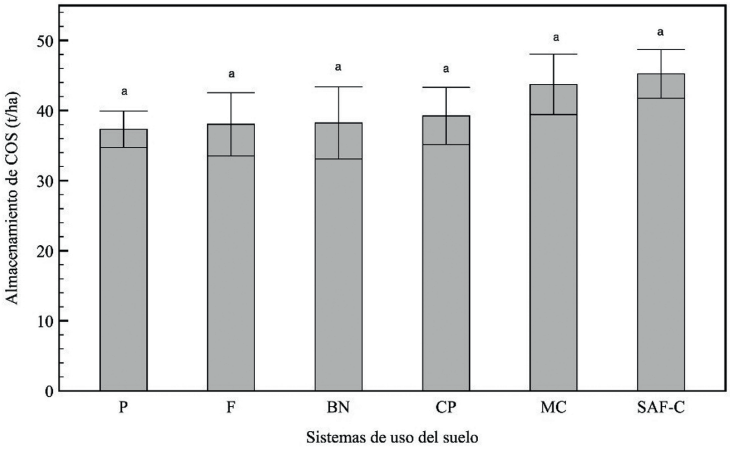

Figura 35. Almacenamiento de carbono orgánico del suelo a una profundidad de 0-30 cm en sistemas de uso del suelo predominantes en la parte media de la quebrada La Plata, (Ibagué, Tolima, Colombia). SAF-C: sistemas agroforestales con café; MC: monocultivos de café; CP: cultivos perennes (granadilla - mora); P: pastos de corte; F: fríjol; B: bosques nativos. Las barras de error corresponden a error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$).

La magnitud en el almacenamiento de COS depende de diversos factores, como el tipo de suelo que está ligado a su génesis, el clima y el manejo (González *et al.,* 2014). Por ejemplo, varios autores reportan montos mayores pero con gran variabilidad, tal como Rojas *et al.* (2018) (63,3 - 217,0 t/ha) en paisajes alto-andinos de Santa Isabel, Tolima, Chichilla *et al.* (2011) en suelos derivados de cenizas volcánicas en la cordillera de Talamanca en Costa Rica (6,5 - 262,8 t/ha) y Andrade *et al.* (2016) en diferentes usos del suelo en el municipio de Piedras, Tolima (50,2 a 87,1 t/ha).

7.3.4. Implicaciones del cambio de uso del suelo sobre el COS

La Tabla 19 detalla el impacto de potenciales cambios de uso del suelo en el almacenamiento de COS; valores positivos significan incrementos, por medio de captura de C, y los negativos emisiones de CO_2. En general, la deforestación para que estas áreas sean convertidas a P y F implicaría emisiones de 1,1 t CO_2/ha; sin embargo, si esa pérdida de bosque trae consigo el establecimiento de cultivos perennes o café en monocultivo o en SAF, se capturaría entre 1,1 y 7,7 t CO_2/ha (Tabla 19). Si los P y F se convirtieran a otro uso del suelo se estaría capturando entre 1,1 y 8,8 t CO_2/ha. Se observa que los árboles en cafetales no causan incremento en el COS, por el contrario, los resultados sugieren reducciones que indican emisiones de este GEI. Es de aclarar que dichos resultados son hipóteticos y están basado en los resultados de existencias de COS en cada uso del suelo.

Tabla 19
Posibles cambios en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (t CO_2e/ha) por cambios potenciales de sistemas de uso del suelo en la microcuenca de La Plata (Ibagué, Colombia)

		Sistema de uso del suelo futuro					
		BN (39,4 t/ha)	CP (41,5 t/ha)	MC (41,1 t/ha)	SAF-C (39,7 t/ha)	F (39,1 t/ha)	P (39,1 t/ha)
Sistema de uso del suelo actual	BN (39,4 t/ha)	-	7,7	6,2	1,1	–1,1	–1,1
	CP (41,5 t/ha)	–7,7	-	–1,5	–6,6	–8,8	–8,8
	MC (41,1 t/ha)	–6,2	1,5	-	–5,1	–7,3	–7,3
	SAF-café (39,7 t/ha)	–1,1	6,6	5,1	-	–2,2	–2,2
	F (39,1 t/ha)	1,1	8,8	7,3	2,2	-	0,0
	P (39,1 t/ha)	1,1	8,8	7,3	2,2	0,0	-

BN: bosque nativo; CP: cultivos perennes; MC: monocultivos de café; SAF-C: sistemas agroforestales con café; F: cultivos de fríjol; P: pastos de corte. Los valores entre paréntesis corresponden al almacenamiento de COS, de 0-30 cm, los cuales han sido estimados empleando la densidad aparente del bosque nativo. Signos positivos corresponden a captura de carbono, mientras que los negativos representan emisión de CO2.

Resultados similares se encontraron en Andrade *et al*. (2014), quienes reportan aumento del COS de 12,8 t/ha al pasar de BN a pasturas activas con manejo extensivo. En contraste, los resultados de Rojas *et al.* (en preparación) en el municipio de Santa Isabel proyectan que el cambio de uso del suelo de los pastizales con árboles y cultivos transitorios a bosques podría almacenar en promedio 156 t CO_2/ha o perder la misma cantidad si los bosques se pierden. De igual forma, en el municipio de Piedras (Tolima) Andrade *et al.* (2016) calcularon que al cambiar la cobertura de pasturas a áreas con regeneración natural se reduciría en promedio 35,8 t CO_2/ha, las cuales serían emitidas a la atmósfera.

De acuerdo con la FAO (2002), las actividades antrópicas que generan deforestación al incrementar áreas para el pastoreo y cultivos extensivos, causan pérdidas de entre 40% y 50% en el almacenamiento de COS en pocas décadas. Asimismo, el cambio de uso del suelo hacia sistemas más amigables con el medioambiente usualmente incrementa el COS dependiendo de la tasa de crecimiento de los árboles, la acumulación de materia orgánica y la actividad microbiana (Robert, 2002). La variación del COS también implica la interacción de la vegetación (tasa de descomposición, tasa de acumulación de biomasa y la composición de las plantas), los factores climáticos (humedad, temperatura, precipitación) y las propiedades físico-químicas del suelo (Fassbender & Bornemisza, 1988; FAO, 2002).

7.4. Conclusiones

La densidad aparente y la concentración de carbono orgánico en el suelo no resultaron afectadas por los sistemas de uso del suelo más dominantes en la microcuenca de la quebrada La Plata. Esto indica la importancia de los factores edáficos, tal como la génesis del suelo y climáticos en este servicio ecosistémico. Aunque no se encontró relación estrecha entre la densidad aparente y la concentración de COS, incrementos de la captura de carbono tienden a reducir la densidad aparente del suelo. Esta situación presentaría un doble beneficio ambiental al capturar carbono atmosférico, lo que redunda en una mitigación del cambio climático y el mejoramiento de la calidad y salud de los suelos.

El cambio de uso de suelos de bosques nativos a sistemas de producción agropecuarios cambia las existencias de COS. Sin embargo, el empleo de sistemas de producción que incluyan leñosas perennes es más favorable que el uso de pastos y cultivos de fríjol. Es importante considerar que este análisis incluye solo el COS y habría que incluir otros componentes de C y otros servicios ecosistémicos brindados por los bosques nativos, lo cual haría que su destrucción sea aún más perjudicial para el medio ambiente.

7.5. Agradecimientos

Los autores agradecen a los habitantes de la microcuenca de la quebrada La Plata por permitir el ingreso y la toma de muestras en los predios; a la Oficina Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima por la financiación del proyecto de alianza de grupos con código 290113 y a los integrantes de los grupos de investigación aliados a este proyecto.

7.6. Referencias

Alcaldía de Ibagué (2013). *Estructura ecológica principal municipal*. Recuperado de https://issuu.com/elnuevodia/docs/documento_estructura_ecologica_prin

Alvarado, J., Andrade, H. J., y Segura M. A. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* l.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal, 16*(1), 20-31.

Andrade, H., e Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas, 10*(39-40), 109-116.

Andrade, H. J., Segura, M. A., y Rojas, A. S. (2016). Carbono orgánico del suelo en bosques riparios, arrozales y pasturas en Piedras, Tolima, Colombia. *Agronomía Mesoamericana, 27*(2), 233-241.

Andrade, H. J., Segura, M. A., Somarriba, E., y Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 43, 45-50.

Andrade, H., Espinosa, E., y Moreno, H. (2014). Impact of grazing in soil organic storage carbon in high lands of Anaime, Tolima, Colombia. *Zootecnia Tropical, 32*(1), 7-21.

Beltrán, D., y Erazo, A. (2017). *Captura de carbono en raíces finas y estructurales en bosques alto-andinos y sistemas agroforestales en asocio con árboles dispersos y cultivos en Santa Isabel, Tolima.* Ibagué: Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal.

Benavides, E., Morales, L. N., y Navia, J. F. (2015). Propiedades físicas y contenido de materia orgánica en diferentes usos del suelo en Samaniego, Colombia. *Agroforestería Neotropical*, 5, 27-41.

Carvajal, A. F., Feijoo, A., Quintero, H., y Rondón, M. A. (2009). Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Rev. Ci. Suelo Nutr., 9*(3), 222-235.

Chinchilla, M., Mata, R., y Alvarado, A. (2011). Andisoles, inceptisoles y entisoles de la subcuenca del río Pirris, región de Los Santos, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense, 35*(1), 83-107.

Ellert, B. H., Janzen, H. H., y Entz, T. (2002). Assessment of a method to measure temporal change in soil C storage. *Soil Science Society of America Journal,* 66, 1687-1695.

Estupiñán, L. H., Gómez, J. E., Barrantes, V. J., y Limas, L. F. (2009). Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el páramo El Granizo (Cundinamarca - Colombia). *Actualidad & Divulgación Científica, 12*(2), 79-89.

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio [EEM] (2003). *Ecosistemas y bienestar humano: marco para la evaluación.* Informe del Grupo de Trabajo sobre el Marco Conceptual de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. World Resources Institute.

Fassbender, H., y Bornemisza, E. (1988). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Recuperado de http://orton.catie.ac.cr/repdoc/ A9793E/ A9793E.PDF

Fassbender, H. (1993). *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales* (2.ª ed.). Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [Catie].

Ferreras, L., Toresani, S., Faggioli, V., y Galarza, C. (2015). Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un agriudol de la región pampeana argentina. *Spanish Journal of Soil Science, 5*(3), 227-242.

García, J. C., Dossman, M. A., Rodríguez, J. A., Arias, L. M., Galvis, J. H. (2012). Cambios en las propiedades del suelo, posteriores a un incendio en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia. *Acta Agronómica*, *61*(2), 151-165.

González, L., Acosta, M., Carrillo, A., Báez, A., y González, J. (2014). Cambios de carbono orgánico del suelo bajo escenarios de cambio de uso del suelo en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 5*(7), 1275-1285.

Holdridge, L. (1996). *Ecología basada en zonas de vida.* San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P.,... Rojas, J. (2007). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas,* 45, 27-36.

Jaurixje, M., Torres, D., Mendoza, B., Henríquez, M., y Contreras, J. (2013). Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, Estado Lara. *Biagro, 25*(1), 47-56.

MacDiken, K. (1997). *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Arlington, VA, USA: Winrock International.

Mannetje, L., Amézquita, M. C., Buurman, P., e Ibrahim, A. (2008). *Carbon sequestration in tropical grassland ecosytems*. Recuperado de https://doi.org/10.3920/978-90-8686-632-8

Marín, P., Andrade, H., y Sandoval, A. (2016). Fijación de carbono atmosférico en la biomasa total de sistemas de producción de cacao en el departamento del Tolima, Colombia. *Actualidad y Divulgación Cientifica, 19*(2), 351-360.

Martínez, E., Fuentes, J. P., y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr*., *8*(1), 68-96.

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2016). *Política para la gestión sostenible del suelo.* Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Montes-Pulido, C. R., Ramos Miras, J. J., y San José Wery, A. M. (2017). Estimation of soil organic carbon (SOC) at different soil depths and soil use in the Sumapaz paramo, Cundinamarca - Colombia. *Acta Agronómica, 66*(1), 95-101.

Morales, J. C., Carrillo, F. M., Farfán, L. M., y Cornejo, V. M. (2016). Cambio de cobertura vegetal en la región de Bahía de Banderas, México. *Caldasia,* 38(1), 17-29.

Muñoz, J., Macías, H., Palomo, M., Cano, A., y Rivera, M. (2014). Efecto de la labranza de conservación sobre la humedad y la densidad aparente de un suelo. *Agrofaz, 14*(2), 39-44.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2002). Principales consecuencias e impacto de la captura de carbono. En *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre los recursos mundiales de suelos.* Roma.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2016). *Pérdida de carbono orgánico del suelo (COS).* Recuperado de http://www.fao.org/3/a-i6472s.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2017). *Conservación de suelos y aguas en América Latina y el Caribe*.

Orjuela, J., Andrade, H., y Vargas, Y. (2014). Potential of carbon storage of rubber (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg) plantations in monoculture and agroforestry systems in the Colombian Amazon. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 17*, 231-240.

Orozco, J., Cedillo, J., Juan, J., y Balderas, M. (2012). Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el altiplano mexicano. El caso del río San José en el estado de México. *Papeles de Geografía, 55*(56), 63-73.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC] (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC*. Japón.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC]. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero,* volumen 4: *Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra*. Japón: IGES.

Peláez, O., y Santamaría, Y. (2010). *Agenda ambiental del municipio de Ibagué.* Ibagué: Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima] - Alcaldía Municipal de Ibagué.

Riaño, E. (2014). *Informe del estado de los recursos naturales y del medioambiente del municipio de Ibagué*, vigencia 2013. Ibagué: Contraloría Municipal.

Robert, M. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra.* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.

Rojas, A. S., Andrade, H. J., Segura, M. A. (2018). Los suelos del paisaje altoandino de Santa Isabel (Tolima, Colombia) ¿Son sumideros de carbono orgánico? Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica, 21 (1): 51 - 59.

Salamanca, J., y Sadeghian, K. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé, 56*(4), 381-397.

Salamanca, A., y Sadeghian, S. (2004). La densidad aparente en suelos de la zona cafetera y su efecto sobre el crecimiento del cafeto. *Avances técnicos Cenicafé,* 326, 2-8.

Walkley, A., y Black, C. A. (1934). An examination of the Degtajareff's method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.

Zúñiga, O., Peña, E. J., Torres, A. M, Cuero, R., y Peña, J. A. (2013). Assessment of the impact of anthropic activities on carbon storage in soils of high montane ecosystems in Colombia. *Agronomía Colombiana, 31*(1), 112-119.

8

Huella hídrica de los sistemas de producción agrícola predominantes en zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia)

Perla Tatiana Varón Vargas[1]*; Mayra Alejandra Barragán Machado[2]; Raúl Stiven Siachoque García[2]; Jader Muñoz Ramos[3] y Antonio José Guío Duque[3].

Resumen

La cuenca del río Combeima es importante para el desarrollo del municipio de Ibagué (Tolima, Colombia) por los múltiples bienes y servicios de sus ecosistemas naturales y el aporte de 96,7% del suministro de agua que abastece al acueducto de la ciudad. Las actividades productivas desarrolladas históricamente en las zonas de ladera han favorecido procesos de deforestación que acarrean aumento en la erosión de suelos y alteración de la calidad y disponibilidad del agua, situación que pone en riesgo la sostenibilidad del recurso hídrico en la cuenca. Por esta razón, se llevó a cabo un estudio de campo que permitiera evaluar la huella hídrica (HH) de los sistemas de producción agrícola predominantes en la cuenca del Combeima para el año 2015, con el ánimo de establecer causas y consecuencias de dicha problemática a los niveles ambiental, económico y social, mediante la estimación de puntos de referencia que se traduzcan en una propuesta para el manejo sostenible del agua. Se estimaron las HH azul (HA), verde (HV) y gris (HG) según metodologías soportadas en la aplicación del *software* CropWat 8.0 y los valores de calidad y disponibilidad del recurso. Los resultados evidenciaron un estado crítico por competencia del agua verde en la cuenca.

Palabras clave: cuencas hidrográficas, gestión del recurso hídrico, planificación del territorio, servicios ecosistémicos.

1 Maestría en Gestión Ambiental y Evaluación del Impacto Ambiental, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.

2 Programa de Ingeniería Forestal, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.

3 Grupo de Investigación "Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales" (Proecut), Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima.

* Autor para correspondencia, correo electrónico: titakana1@gmail.com

Abstract

The basin of the Combeima river is important for the development of municipality of Ibagué (Tolima, Colombia), due to the several goods and services of the ecosystems end the supply of 96.7% of the water for the city. The productive activities historically developed in the slopes have favoured deforestation that increase soil erosion and cahanges in water availability and quality, increasing the risk of the sustainability of the water resource in the basin. For this reason, it was carried out a field study to allow estimating water footprint (WF) for the agricultural productive systems in the Combeima basin for 2015, with the objective of establishing causes and consequences of the situation in the environmental, economical and social issues, using reference points for the design of a proposal for sustabile management of water. The blue, green and gray WF were estimated based on methodologies supported on the software CROPWAT 8.0 and the quality and availability of this resoruce. The results show a critical status of competence of green water in the basin.

Palabras clave: hydrological basins, management of water resources, planification of territory, ecosystem services.

8.1. Introducción

La cuenca del río Combeima tiene una importancia estratégica para el desarrollo territorial del municipio de Ibagué debido a que aporta, entre otros, el 96,7% del suministro de agua que abastece al acueducto de la ciudad (comunicación verbal del jefe del Grupo Técnico de la empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado [IBAL], el 03 de agosto de 2016) y riega alrededor de 7000 ha de cultivos (Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima], 2009). Además, es una zona especialmente sensible por el déficit existente de agua en gran parte de su territorio, al punto que la cuenca ha sido definida como una de las de mayor índice de escasez en la región (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2009).

Sobre las zonas de ladera se desarrollan actividades asociadas a sistemas productivos que favorecen la deforestación y el aumento de la escorrentía superficial, el transporte de material suspendido, la alteración de la calidad del agua, la disminución del caudal medio de la cuenca (DNP, 2009) y la generación de residuos de pesticidas, fertilizantes y otros sólidos (Universidad del Tolima, 2003). Estos eventos desencadenan procesos de óxido-reducción de la materia orgánica y mineralización del agua (Leonel *et al*., 2000) que afectan la calidad de vida y aumentan los costos de producción, lo que conlleva una baja

rentabilidad de los sistemas productivos (Muñoz *et al*., 2014). Aunque esta problemática ha sido claramente identificada, es poca la información respecto de sus efectos sobre la sostenibilidad del agua.

La huella hídrica (HH) es una herramienta que permite evaluar la sostenibilidad de los recursos hídricos según el volumen total de agua utilizada por los habitantes de determinada región (Tolón *et al*., 2013). La HH está definida por tres componentes: i) la huella hídrica verde (HV), que es el volumen de agua evaporada de los recursos hídricos del planeta (agua de lluvia almacenada en el suelo como humedad); ii) la huella hídrica azul (HA), que es el volumen de agua dulce consumida de los recursos hídricos del planeta (aguas superficiales y subterráneas), y iii) la huella hídrica gris (HG), que es el volumen de agua contaminada asociada a la producción de bienes y servicios (Arévalo, 2012).

La mayoría de los estudios que se han desarrollado sobre la cuantificación de la HH en temas agrícolas y pecuarios han determinado su valía como una herramienta de diagnóstico (Rodríguez da Silva *et al*., 2009; Dourt, Fraisse & Uryasev, 2013; Ridout & Pfister, 2014). García *et al*. (2014) identificaron puntos críticos en el proceso de riego para la producción de los cultivos mediante el análisis de acciones específicas que mejoren la eficiencia del uso del agua, al reducir las extracciones y retornos del recurso contaminado, para mantener las tasas de producción.

En este contexto, se planteó un trabajo de investigación que tuvo como objetivo evaluar la HH de los sistemas de producción agrícola predominantes en zonas de laderas de la cuenca del río Combeima, con el fin de identificar las relaciones causa-efecto a nivel socioambiental, mejorar la gestión del agua en la cuenca y proponer estrategias de respuesta.

8.2. Materiales y métodos

El procedimiento metodológico se basó en cuatro fases desarrolladas a partir de las guías del Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia [CTA] (2013a) y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA] (2017a), al igual que de otros trabajos consultados, como Builes (2013), CTA (2013b) e IICA (2017b).

8.2.1. Fase 1. Definición del alcance

Aspectos como la temporalidad, la ubicación geográfica, las etapas y los procesos de los sistemas de producción predominantes se definieron a partir de la información generada por fuentes oficiales y el trabajo en campo en zona de ladera de la cuenca (CTA, 2013a, b).

La caracterización de los sistemas de producción predominantes se realizó partiendo de la identificación de la tipología general de 55 predios elegidos totalmente al azar en el área de estudio en la vigencia 2015, asentados en la zona de estudio preliminarmente. Esta actividad se llevó a cabo con la aplicación de encuestas estructuradas en las que se caracterizaban los aspectos relacionados con su capital humano, social, físico, económico y natural, haciendo énfasis en el análisis del capital natural.

De la información obtenida se definió que las características de este capital se agrupaban teniendo en cuenta cuatro variables: porcentaje de área destinada a conservación, porcentaje de área con pastos, porcentaje de área de sistemas de producción permanentes, porcentaje de área con sistemas de producción transitorio, y la agrupación conforme a la extensión total del predio teniendo en cuenta el criterio de clasificación de cada una de las fincas.

De este análisis se estableció la siguiente tipología de predios: fincas pequeñas con 98% de cultivos permanentes, fincas medianas con 46% de cultivos permanentes y 46% de áreas de conservación, fincas pequeñas con 40% de cultivos permanentes y 42% de cultivos temporales, y fincas grandes sin cultivos temporales, con predominancia de áreas con pastos y áreas destinadas en igual proporción a cultivos permanentes y conservación.

Posteriormente, los grupos de tipologías de finca fueron sometidos a un análisis de conglomerados con el ánimo de escoger predios que mostraran entre ellos disimilaridades bajas. Se escogieron veintiséis fincas, las cuales fueron priorizadas para la caracterización y descripción detallada de los sistemas de producción. A fin de caracterizar y describir los sistemas de producción que se desarrollan en los predios o fincas seleccionadas, se aplicaron encuestas específicas de preguntas dirigidas que permitieran conocer información acerca de las etapas, particularidades y peculiaridades técnicas, tecnológicas, financieras y ambientales de cada uno de los sistemas.

La predominancia del sistema se definió teniendo en cuenta la mayor frecuencia con que el tipo cultivo (sistema de producción) se presenta en los predios y los porcentajes de área sembrada en cada uno. Conforme a lo anterior, se definió que en la zona de estudio los sistemas de producción son los siguientes: fríjol, granadilla, mora y café.

8.2.2. Fase 2: Cuantificación de las huellas hídricas (HH)

Cuantificación de las huellas hídricas azul (HHA) y verde (HHV). Para determinar la HHA y HHV es necesario cuantificar primero el consumo de agua verde (CWUverde) y el consumo de agua azul (CWRazul) del sistema de producción. Para esto se empleó el programa CropWat 8.0 (FAO, 2010), cuya entrada

de datos se basa en la precipitación presente en la zona, de la cual no toda es absorbida por el sistema de producción. Por lo tanto, este *software* realiza las operaciones solo con la precipitación efectiva (agua de precipitación absorbida directamente por el sistema de producción), además tiene en cuenta el agotamiento crítico que se relaciona en la Tabla 20.

Tabla 20

Valores de los parámetros solicitados por el programa Cropwat 8.0 (FAO, 2010) para obtener los valores de huella hídrica verde (HHV) y huella hídrica azul (HHA)

Parámetro de los sistemas de producción	Café	Fríjol	Mora	Granadilla
Fecha de siembra	05/06	01/02	10/05	05/03
Kc (inicial)	0,95	0,40	0,30	0,90
Kc (medio)	0,95	1,15	1,05	1,20
Kc (final)	0,95	0,35	0,50	0,70
Etapa inicial (días)	30	20	45	60
Etapa de desarrollo (días)	30	30	45	60
Etapa media (días)	80	30	45	60
Etapa final (días)	40	10	45	60
Profundidad radicular mínima (m)	0,40	0,20	0,10	0,45
Profundidad radicular máxima (m)	0,60	0,30	0,20	0,60
Agotamiento crítico de humedad (inicial)	0,40	0,45	0,50	0,50
Agotamiento crítico de humedad (medio)	0,40	0,45	0,50	0,50
Agotamiento crítico de humedad (final)	0,40	0,45	0,50	0,50
Factor de respuesta rendimiento (inicial)	0,52	1,15	1,20	1,00
Factor de respuesta rendimiento (desarrollo)	0,52	1,15	1,20	1,00
Factor de respuesta rendimiento (medio)	0,52	1,15	1,20	1,00
Factor de respuesta rendimiento (final)	0,52	1,15	1,20	1,00
Humedad de suelo (mm/m)	96,71	109,52	90,99	70,41
Tasa máxima de infiltración (mm/día)	27,6	26,4	24,5	28,6
Agotamiento inicial de la humedad (%)	0,0	50,0	0,0	0,0
Rendimiento (t/ha/ciclo)	1,56	2,13	5,09	6,4

Fuente: Cerdas y Castro (2003), FAO (2006), Centro Internacional de Investigaciones del Café [Cenicafé] (2007), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam] (2010), Instituto Colombiano Agropecuario [ICA] (2011), Servicio Agrícola Ganadero SAG (2011), Builes (2013), y los manuales de usuario de los programas SPAW Hidrology (2007) y Climwat para CropWat (2016).

La irrigación fue considerada un suplemento de agua que se añade con el propósito de satisfacer las necesidades del sistema de producción que presenta déficit hídrico por bajas precipitaciones. No toda el agua usada para riego es evapotranspirada por el sistema agrícola, una parte de esta regresa al sistema por el drenaje, lo cual arroja una diferencia entre el riego bruto y el riego neto aplicado. Adicionalmente, el volumen de riego aplicado es una decisión humana, por lo cual puede existir diferencia entre el requerimiento de riego del sistema de producción y el riego realmente aplicado.

La fórmula general para la estimación de HHA y HHV por evapotranspiración (ET) es:

$$Rr = Rh\text{-}Pe$$

donde:

Rr : Requerimiento de riego.
Rh : Requerimiento hídrico del sistema de producción.
Pe : Precipitación efectiva.
ETazul : min (riego neto total, requerimiento de riego).
ETverde : min (requerimiento hídrico del sistema de producción, precipitación efectiva).

Si el suelo tiene un déficit de agua al momento de la cosecha, esta ha sido evapotranspirada por el sistema de producción y se asigna a la *ETverde*, entonces:

$$ETverde = ETtav + Déficit\ de\ agua\ al\ momento\ de\ la\ cosecha$$

donde:
ETtav : Evapotranspiración total de agua verde.

La cuantificacion de la HHV y HHA de los sistemas de producción priorizados en el estudio (café, mora, granadilla y fríjol) se estimó entonces como la relación entre CWU verde y azul y la producción del respectivo sistema de producción.

Cuantificación de la huella hídrica gris (HHG). El cálculo de la huella hídrica gris de los sistemas de producción tuvo como referente información respecto a la tasa de lixiviación del nitrógeno que se presenta en el agua debido a la aplicación de fertilizantes y agroquímicos —plaguicidas, insecticidas y herbicidas— en cada una de las actividades de manejo del sistema de producción agrícola.

Para la cuantificación de la HHG se divide la cantidad de fertilizante predominante, es decir, el más utilizado por sistema de producción predominante (kg/ha), entre la diferencia de la concentración máxima permitida (kg/m^3) y la concentración natural (kg/m^3) presentada en la siguiente ecuación (Hoekstra *et al*., 2011):

$$HHG = \frac{L}{Cmax - Cnat}$$

donde:

HHG : Huella hídrica gris (m^3/ha).
L : Cantidad de fertilizante aplicado (kg/ha).
Cmax : Concentración máxima permitida en el agua (kg/m^3).
Cnat : Concentración natural en el agua (kg/m^3).

El valor obtenido corresponderá al valor de HHG de un producto agrícola en una hectárea cultivada (m^3/ha). Sin embargo, es necesario dividir este valor por el rendimiento del sistema de producción agrícola (t/ha) para obtener la cantidad de m^3 de agua que se requiere, por tonelada de producto agrícola, para diluir la carga contaminante que se presenta en el cuerpo de agua (Builes, 2013).

8.2.3. Fase 3: Análisis de sostenibilidad

La sostenibilidad se analizó desde cada uno de sus tres componentes: ambiental, económico y social.

Análisis ambiental. Los valores asociados a la oferta ambiental de agua de la cuenca se consultaron en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (Pomca) del río Coello (Cortolima, Corpoica, Servicio Nacional de Aprendizaje [SENA] & Universidad del Tolima, 2006).

Índice de escasez de agua verde (Everde). La escasez de agua se determinó mediante la relación existente entre la sumatoria de las HHV por sistema de producción y la disponibilidad de agua verde (*DAV*), así:

$$Everde = \frac{\sum HHV}{DAVmes}, \text{ con } DAVmes = ETtotal - ETnatural - ETinprod$$

donde:

Everde : Índice de escasez de agua verde (m^3/ha).
HHV : Huella hídrica verde (m^3/t).
DAVmes : Disponibilidad de agua verde mensual.
ETtotal : Evapotranspiración total (mm/ciclo).
ETnatural : Evapotranspiración natural (porcentaje).
ETinprod : Evapotranspiración en productivas (porcentaje).

La *ETtotal* corresponde a la sumatoria del valor de la evapotranspiración de cada sistema de producción en mm/ciclo, obtenido del *software* CropWat 8.0; por otro lado, la *ETnatural* se obtiene al multiplicar *ETtotal* por 86,66% (porcentaje de cobertura de áreas naturales en zonas de ladera de la cuenca del río Combeima, según Guaque y Barreto, 2017), y finalmente, *ETinprod* es obtenido al multiplicar la *ETtotal* por 0,15% (porcentaje de cobertura de zonas improductivas en la zona de estudio, de acuerdo con Guaque y Barreto, 2017). Los valores de referencia de este índice se encuentran en la Tabla 21.

Tabla 21
Valores de referencia del índice de escasez de agua verde (Everde, ciclo)

Estado	Valor de referencia
Crítico	> 1,0
Muy alto	0,8 – 1,0
Alto	0,5 – 0,8
Moderado	0,3 – 0,5
Bajo	0,1 – 0,3
Muy bajo	< 0,1

Fuente: IICA (2017b).

Nivel de contaminación del agua (NCA). La contaminación del agua se obtuvo mediante la relación entre la sumatoria de las HHG de los sistemas de producción y el valor de la oferta total de la cuenca (caudal disponible capaz de asimilar la contaminación generada por cada uno de los sistemas de producción), obtenida del Pomca del río Coello, así:

donde:

$$NCAmes = \frac{\sum HHGmes}{Rtotal,mes}$$

NCAmes : Nivel mensual de contaminación del agua.
HHGmes : Huella hídrica gris mensual (m^3/t).
Rtotal,mes : Escorrentía total mensual (m^3/t).

La valoración del NCA se da de conformidad con lo establecido por el IICA (2017) y se puede ver en la Tabla 22.

Tabla 22
Valores de referencia del nivel de contaminación del agua (NCA)

Capacidad de asimilación	Valores de referencia
Excedida	> 100%
Adecuada	< 100%

Fuente: IICA (2017).

Análisis económico. Para este análisis, a cada ciclo de cultivo se le calculó la productividad aparente del agua (AWP, por sus siglas en inglés) y la productividad aparente de la tierra (APL, por sus siglas en inglés), de acuerdo con los precios de café, mora, granadilla y fríjol que se consultaron en los boletines de precios del mercado emitidos por la Central de Abastos de Colombia (Corabastos).

Productividad aparente del agua (AWP). La productividad aparente del agua se obtuvo mediante análisis cuantitativo y económico del recurso hídrico, así (CTA, 2013a)

donde: $$AWP = \frac{Precio\ de\ mercado\ del\ sistema\ de\ producción}{HHV\ sistema\ de\ producción}$$

AWP: Productividad aparente del agua (pesos colombianos, COP).
HHV: Huella hídrica verde del sistema de producción agrícola (m^3).

Productividad aparente de la tierra (APL). La productividad aparente de la tierra se determinó según el valor económico por hectárea cultivada, así:

APL = Precio de mercado del sistema de producción * Rendimiento

Análisis social. Los valores de la oferta natural disponible se tomaron de los reportados en el Pomca del río Coello y la información levantada en campo.

Se incluyeron los criterios fundamentales de sostenibilidad social definidos en el IICA (2017b), como la protección física y mental, el empoderamiento comunitario y la provisión de servicios esenciales, el trato justo y la asignación del recurso hídrico en función de las necesidades de los seres que habitan las zonas de ladera, así como los ecosistemas y las actividades

antrópicas para garantizar la calidad de vida y la gestión del recurso hídrico. A continuación dichos criterios se desglosan con mayor detalle:

- El caudal prioritario reservado; en este caso se comparó la oferta natural disponible (oferta natural menos el caudal mínimo ecológico y menos el caudal de dotación para abastecimiento humano) y la oferta regulada disponible de la cuenca (oferta regulada menos el caudal mínimo ecológico y menos el caudal de dotación para abastecimiento humano), a fin de identificar el estrés hídrico.
- Los indicadores de salud pública, como enfermedades de origen hídrico y el índice de riesgo de calidad del agua (IRCA) para consumo humano.
- Cobertura de servicios básicos domiciliarios de agua.

8.2.4. Fase 4: Estrategias de respuesta

Se elaboraron estrategias en la cuenca que apuntan a reconocer particularidades y la formulación de acciones concretas en los puntos críticos del territorio (CTA, 2013b). Las acciones necesarias para solucionar las problemáticas identificadas sobre el uso del agua fueron descritas mediante un proceso de construcción gradual y colectiva, con el ánimo de formular lineamientos basados en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

8.3. Resultados y discusión

8.3.1. Caracterización de los sistemas de producción

Se encontró que en la zona 95% de las fincas tienen menos de 20,8 ha de extensión, 65% de ellas poseen menos del 8,9% de su área destinada a conservación y a manejo forestal, 75% de los predios destinan cerca del 13,1% del área a potreros y 55% de los predios utilizan 80% de su área a sistemas de producción agrícolas permanentes y 86,7% emplea 13,3% de área a sistemas de producción transitorios (Tabla 23). Estos sistemas de producción son seleccionados por presentar mayor frecuencia, es decir, mayor cobertura en el área de estudio y mayor extensión o área sembrada (Tabla 24).

Tabla 23
Cantidad de fincas donde se registraron las diferentes clases de sistema de producción

Nombre del sistema de producción	Frecuencia absoluta en fincas	Porcentaje (%)
Fríjol	6	13,3
Granadilla	9	20,0
Mora	17	37,8
Café	13	28,9
Total	45	100,0

Tabla 24
Extensión de cada sistema de producción en el área de estudio

Sistema de producción	Extensión (ha)
Fríjol	5,8
Granadilla	9,4
Mora	20,6
Café	24,8
Total	60,5

Las características de cada uno de los sistemas de producción agrícolas predominantes (Figura 36) se describen a continuación:

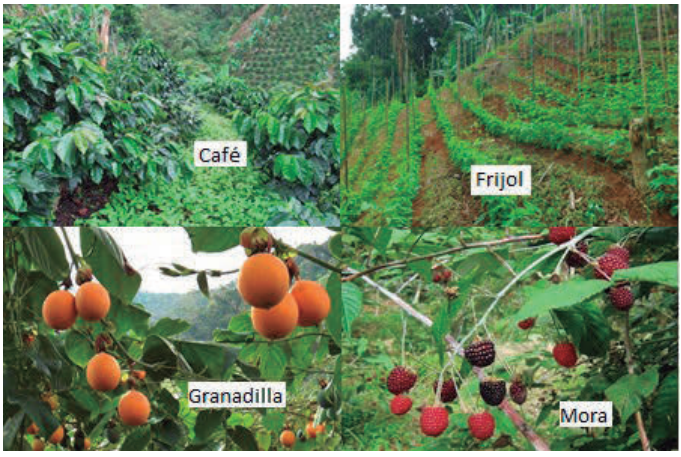

Figura 36. Sistemas de producción agrícolas predominantes en la zona de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia).

Sistema de producción de café. Ocupa 24,83 ha, equivalentes al 33,5% del total de las hectáreas sembradas en la zona de estudio; su ciclo de producción corresponde a ciento ochenta días, cuando se puede obtener la primera cosecha después de estar establecido en el terreno. La germinación se realiza los primeros dos meses por medio del método de piso; luego de establecida la germinación se prepara y desinfecta el terreno durante un mes utilizando el azadón y el palín, ya que por las pendientes marcadas de la zona no se puede utilizar maquinaria. Para la desinfección del terreno se utilizan productos agroquímicos como insumo 70®, aplicado directamente a la planta en contorno. Listo el terreno, se procede a realizar la siembra, que cuenta con una duración de treinta días, sembrado en cuadro de 4 × 4 m, y una vez sembrada la planta se fertiliza dos veces por mes durante nueve meses aplicando Triple 15® y Urea®. Además de esto, se utilizan herramientas como machetes y guadañas para el control de malezas, plagas y enfermedades que se puedan presentar en el sistema de producción. Por otro lado, se aplican al sistema productos químicos como Glicocafé®, Glifosol®, Lorsban® por medio de una bomba de espalda. Después de las etapas anteriores el producto es recolectado a mano, despulpado durante dos días y entregado en costales de una arroba seca al intermediario para que realice su comercialización.

Sistema de producción de fríjol. Su extensión en la zona de estudio corresponde a 7,8% del total de las hectáreas sembradas, es decir, 5,8 ha. Cuenta con un ciclo de producción de noventa días para recolectar la primera cosecha. En este sistema de producción se utiliza el método de germinación aéreo, que tiene una duración de treinta días, igual a la de la preparación y desinfección del terreno, en la que se emplean herramientas como machete y azadón, al igual que la aplicación de agroquímicos como Cal®, Glifosato®, Paraquat® y Yodo®. Se procede después a realizar la siembra (0,30 × 0,30 m), luego la fertilización con los agroquímicos Glifosato® y Urea® aplicados una vez se establece la plántula, y la abonada con productos como el Triple 15® aplicado en contorno directamente a la planta. Para las posibles malezas, plagas y enfermedades que pueda presentar el sistema de producción se realiza un control mensual aplicando productos como Glifosol®, Gramaxone® y Lorsban®, aplicados a las plantas mediante la aspersión producida por la bomba de espalda, así como el corte de la maleza con machetes. Transcurridas las etapas anteriores el producto es cosechado teniendo en cuenta el color del fruto, el cual indica su madurez y por lo tanto su punto óptimo de comercialización.

Sistema de producción de granadilla. Ocupa 9,4 ha, esto es, 12,6% del total de área sembrada. Se caracteriza por presentar un ciclo de vida de cuatro a seis años y ocho meses para obtener la primera cosecha. Su germinación se realiza de manera aérea con ayuda de humus orgánico para su fertilización. La

preparación del terreno se hace de forma manual con azadón, machete y palín, sin la utilización de productos orgánicos, al contrario de la desinfección, en que se utilizan productos como Helmistin® orgánico y Yodo® inorgánico. Una vez listo el terreno se procede a realizar la siembra en cuadro (4 × 4 m), donde las plántulas son fertilizadas foliarmente durante un mes con productos como Fertigro® y Urea®. Después de esto, por tres meses se efectúa la abonada de terreno con productos como 1030®, Cerostress® y Boro 5® aplicados de manera foliar, y Triple 15® en el contorno de la planta. El control que se le hace al sistema respecto de malezas, plagas y enfermedades también es manual, en unos casos con machete y azadón, y químico en otros, con productos como Acarotal® y Timorex®. Ocho meses después de sembradas las plantas se recolecta la cosecha, el fruto es depositado en recipientes y comercializado según su color, tamaño y maduración.

Sistema de producción de mora. El total de hectáreas sembradas en este sistema de producción corresponde al 27,7%, o sea 9,4 ha. En él se realiza la germinación de las semillas por el método de piso y se fertilizan con productos como Fertigro® y Urea®. Para la preparación y desinfección del terreno se aplican productos químicos con la bomba de espalda, tales como Glifosato®, Cal® y Lorsban®. La siembra de este sistema se lleva a cabo en cuadro, a una distancia de 1,5 × 1,5 m, usando fertilizantes como Glifosato® y Urea®; abono se hace con Triple 15®, 10-30-10® y Urea® durante un mes. Con relación al control de malezas, plagas y enfermedades, durante un mes se aplican por medio de aspersión productos como Glifosol®, Gramaxone® y Lorsban® con el fin de obtener un producto en buen estado al momento de la cosecha en recipientes, que luego se comercializa en canastillas y se entrega a un intermediario.

8.3.2. Cuantificación de la huella hídrica de los sistemas de producción

En cuanto a la cuantificación de la HHV se encontró que de los cuatro sistemas productivos predominantes que consumen agua verde, el que mayor consumo de agua demanda es el café, con cerca del 3375,2 m^3/t, y el de menor consumo es el sistema de mora, con 733,6 m^3/t. Los dos sistemas de producción restantes —granadilla y fríjol— presentan valores similares: 1199,5 y 1220,3 m^3/t, respectivamente (Figura 37).

El valor obtenido de la HHV para el sistema de producción de café se debe a que en secano se tiende a consumir mayor cantidad de agua por precipitación. Además, el desarrollo de las plantas en pendientes marcadas no permite que se mantenga una reserva de agua en sus raíces, sino por el contrario, se suplen sus necesidades hídricas con el agua de precipitación (Ideam, 2015).

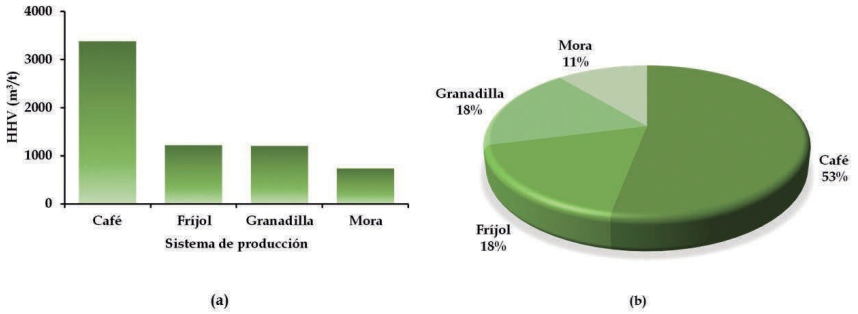

Figura 37. a) Huella hídrica verde (HHV) de los sistemas de producción predominantes en zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). b) Porcentaje de la HHV de cada uno de los sistemas de producción predominantes.

Además, la extensión total del sistema de producción en la zona de estudio es mayor al resto de sistemas que se encuentran allí, tal como se expone en los estudios de Arévalo *et al.* (2011), Builes (2013) e Ideam (2015), realizados para el sector agrícola a nivel nacional; por lo tanto, la demanda hídrica también será mayor en estos casos.

El menor valor de HHV corresponde al sistema de producción de mora, lo cual se debe principalmente al área cultivada en la zona de estudio. Este sistema de producción presenta la menor área sembrada con respecto a los demás sistemas predominantes en la zona. En la mora, al presentar menor área, su competencia por HHV está en desventaja respecto de los demás sistemas de producción con mayor área, resultado que concuerda con lo dicho por Sameral *et al.* (2011) y Sevilla (2015).

Por otro lado, los suelos franco arcillosos, como los que se presentan en la zona de estudio, contribuyen a mantener la humedad del suelo; según SADR (2014), estos suelos son propicios para la mora, ya que permiten que en las raíces se conserven y mantengan la reserva de agua y la humedad, supliendo las necesidades hídricas del sistema. Además, Grijalba *et al.* (2010) mencionan que para la mora el riego solo por precipitación le permite al sistema de producción desarrollarse sin inconvenientes, manteniendo niveles de producción estándar. En este estudio la mora fue el segundo sistema con mayor rendimiento: 5,09 t/ha/ciclo.

Los sistemas de producción de fríjol y granadilla presentan una HHV similar, teniendo en cuenta que la extensión del fríjol es menor a la de granadilla (5,8 y 9,4 ha, respectivamente). Se puede afirmar que el cultivo de fríjol consume más agua por precipitación, ya que las plantas leguminosas requieren cantidades de agua suficientes para que su fruto tenga un desarrollo óptimo, la falta de riego puede generar vainas de menor longitud y grosor (Movilla *et al.*, s. f.), que son poco apetecidas por el mercado. Con relación al sistema de

producción de la granadilla, el comportamiento es similar al sistema de fríjol, la presencia de déficit hídrico obstaculiza el debido desarrollo de los frutos, pero el exceso de humedad contribuye a la pudrición de la planta (Villalba *et al.*, 2006).

Cuantificación de la huella gris (HHG): los sistemas de producción agrícola predominantes en la zona de estudio presentaron una HHG de 137,1 m^3/t (Figura 38a). Los sistemas de producción con mayor y menor consumo de agua para diluir las cargas contaminantes fueron mora y fríjol, respectivamente (Figura 38b). Es preciso mencionar que el agua gris evalúa exclusivamente el efecto producido por un vertido al medioambiente. En Colombia la información sobre pesticidas es muy escasa, por lo cual suele calcularse solo para fertilizantes; entre ellos, el fósforo (P) y el nitrógeno (N) son los más importantes (Lozano & Cortés, 2016).

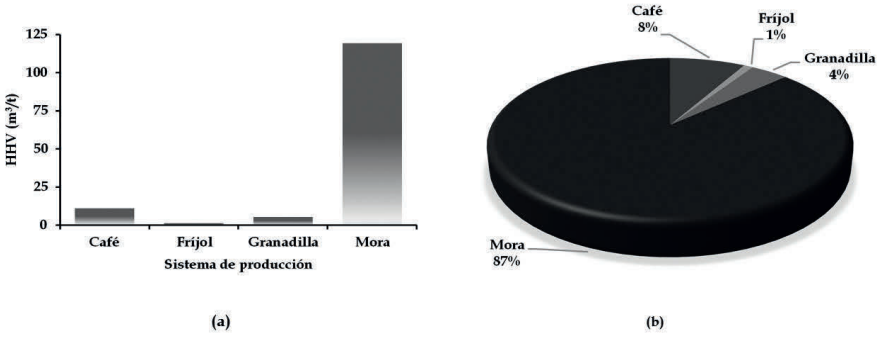

Figura 38. Huella hídrica gris (*HHG*) de los sistemas de producción predominantes en zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). a): Consumo de agua (m^3) para diluir las cargas contaminantes por tonelada de producción de los sistemas priorizados. b): relación porcentual de la HHG en los sistemas de producción predominantes.

Debido a la alta susceptibilidad de la mora a problemas sanitarios, se requiere aplicar agroquímicos y fertilizar para controlar las plagas y enfermedades en el sistema de producción (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2011), lo que explica el alto consumo de agua para diluir los contaminantes (Figura 38). Huella hídrica gris (HHG) de los sistemas de producción predominantes en zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). a): Consumo de agua (m^3) para diluir las cargas contaminantes por tonelada de producción de los sistemas priorizados. b): relación porcentual de la HHG en los sistemas de producción predominantes.38a). La HHG se obtuvo al cuantificar el aporte de nitrógeno proveniente de agroquímicos (como Triple 15®, Triple 16® y Urea®), pues otros componentes se fijan más en el suelo —como el fósforo— y no alcanzan a llegar por lixiviación a las fuentes hídricas (Builes, 2013).

El manejo de químicos para la producción de café en el área de estudio es escaso debido a que este sistema cuenta con certificación de buenas prácticas agrícolas, es decir, manejo orgánico y/o natural del cultivo respecto a fertilización, abono y control de plagas, enfermedades y malezas, hecho que explica su baja HHG (Figura 38). Huella hídrica gris (HHG) de los sistemas de producción predominantes en zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia). a): Consumo de agua (m^3) para diluir las cargas contaminantes por tonelada de producción de los sistemas priorizados. b): relación porcentual de la HHG en los sistemas de producción predominantes.38b).

Sin embargo, el pH del suelo entre 5,2 y 6,7, y la saturación de aluminio entre 3% y 4% pueden afectar la fertilidad y el desarrollo de la raíz por bloqueo de los haces vasculares (Centro Nacional de Investigaciones del Café [Cenicafé], 2007), lo cual hace que se deba aplicar productos como Triple 15® y Urea®. Además, ha de tenerse en cuenta que algunas variedades de café cultivadas en Colombia (típica, borbón, maragogipe, tabi, caturra y castillo) poseen potencial para formar un sistema radical óptimo, pero se puede afectar en condiciones de suelo desfavorables (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [FNC]-Cenicafé, 2007). Esta situación se refleja en un desarrollo deficiente de la parte aérea y baja producción, hecho que hace necesario el mayor uso de agroquímicos en las zonas donde aún se aplican.

La presencia del nitrógeno en el agua a causa de la aplicación de agroquímicos como Triple 15®, Triple 16® y Urea® contribuyen a la afectación del ecosistema acuático hasta causar la eutrofización de él, reduciendo las plantas y animales del medio acuático. Esta situación también causa la degradación de los suelos debido a la acidificación o alcalinización, y el consumo de agua que contenga nitratos provoca enfermedades intestinales, cancerígenas y urinarias (Torstensson, 1990).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la cuantificación de la HHA y la HHG, la HH calculada en el área de estudio indica que 100% del agua usada para satisfacer las necesidades de los sistemas predominantes de producción proviene de la precipitación. El régimen de precipitación presente en la cuenca del río Combeima permite que la mayoría de sistemas se desarrollen bajo condiciones de no riego. De acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria [ENA] (2014), los sistemas de producción presentes en zonas de laderas y alta montaña en Colombia presentan un valor de HHV mayor a las demás huellas, resultado que concuerda con nuestra zona de estudio.

Los porcentajes obtenidos para cada huella se comportan de manera similar al estudio nacional realizado por el Fondo Mundial para la Naturaleza [WWF por su sigla en inglés] (2012), donde se obtuvieron valores de HH total agrícola para Colombia, distribuidos en: 88%, 7% y 5% para HHV, HHA

y HHG, respectivamente. García (2013) encontró valores de 64%, 16% y 20% para HHV, HHA y HHG, respectivamente, al analizar sistemas de regadío y secano. El agua verde es el principal componente de la HH, puesto que la mayor parte de su producción se realiza en sistemas de secano. Sin embargo, la HHG aporta un 20% al total de la HH, debido a que los cultivos en secano presentan por lo general una baja tasa de aplicación de nitrógeno, lo que unido a sus elevados rendimientos disminuye la tasa de lixiviación.

En el caso de los cultivos intensivos en regadío García (2013) explica que, a pesar de los elevados rendimientos, las altas tasas de aplicación de nitrógeno, junto con una humedad del suelo relativamente elevada y un desarrollo radicular menos extenso en profundidad, hacen que la tasa de lixiviación alcance el 14%. Dicho autor menciona que este valor es muy superior en algunos cultivos, como en el caso de la papa, con una tasa de lixiviación media del 27%, o los cultivos hortícolas, con casi 30% del total de nitrógeno aplicado, lo cual indica que la huella hídrica gris tiene relación directa con la huella hídrica azul, ya que a mayor agua de riego mayor la tasa de lixiviación.

8.3.3. Análisis de sostenibilidad

Análisis ambiental

Índice de escasez de agua verde (Everde). El Everde indica que las zonas de ladera del área de estudio se encuentran en estado crítico (Tabla 25). Este indicador asocia la disponibilidad de agua verde como un factor de insostenibilidad del territorio, reflejado en los conflictos que se presentan en la zona de estudio por el uso del suelo entre las áreas de protección ambiental y la actividad agrícola. La premisa básica de este índice consiste en que no toda el agua verde presente en un área determinada se encuentra disponible para usos productivos, pues una parte debe dejarse para el ambiente, y otra no se puede hacer productiva por razones físicas, como la topografía o los asentamientos urbanos.

Tabla 25
Índices de escasez de agua verde (Everde) y del nivel de contaminación del agua (NCA) para los sistemas de producción agrícola predominantes en las zonas de ladera de la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia)

Índice	Valor
Everde (m^3/ha)	7,583
NCA (%)	0,002

El Everde obtenido concuerda con la tendencia nacional de competencia por agua verde. En el estudio del Ideam (2015) sobre Colombia se encontró que el agua de precipitación disponible para usos productivos es del 38,7% y solo 15% es destinado a áreas protegidas.

Por otro lado, Rodríguez (2016) menciona que en ciertas zonas donde no se tienen áreas protegidas declaradas pero existen ecosistemas estratégicos, la disponibilidad de agua verde puede llegar a estados críticos debido al aumento de las coberturas de cultivo y la reducción de estas zonas de protección.

En la cuenca del Combeima se ha evidenciado que el cambio en las coberturas ascendió en el año 2017 a 52,04% del área total de ella (Guauque & Barreto, 2017), lo que se traduce en que el consumo de agua verde por parte de los sistemas de producción agrícola pone en riesgo los ecosistemas y los servicios que ofrecen, situación que a largo plazo puede generar un cambio directo en la disponibilidad del agua azul (Hoekstra *et al.,* 2011).

Nivel de contaminación del agua (NCA). El valor bajo de NCA encontrado (Tabla 25) evidenció que en 2015 se contó con agua suficiente para diluir hasta las concentraciones máximas permitidas la contaminación del recurso hídrico por el nitrógeno proveniente del uso de agroquímicos en el sistema de producción de mora, principal contribuyente de HHG en la cuenca del Combeima. Este resultado es debido al área cultivada por el sistema de mora, que es tan solo del 27,7% del área total de los sistemas de producción.

Una situación similar fue reportada por Builes (2013) para la cuenca del río Porce, donde encontró que la fuente hídrica contaba con la capacidad de diluir las cargas contaminantes aportadas por los productos utilizados en las actividades agrícolas y pecuarias dentro de ella.

Liu *et al.* (2012) desarrollaron un análisis sobre los niveles de contaminación de agua al relacionar la HHG con el caudal circulante, lo que permite establecer la capacidad de asimilación de contaminantes. El NCA puede ayudar a identificar la sostenibilidad o no de los flujos de agua, al relacionar la componente gris de un flujo de la HH con la capacidad de asimilación de contaminantes en una cuenca determinada.

Por otro lado, los resultados obtenidos por García (2013) muestran un NCA mayor al 100%, lo cual significa que existen problemas de contaminación generalizada, pero el volumen que representan estos flujos con respecto al total de la HHG del sector no supera en ningún caso los 50 hm^3/año, relativizando la presión ejercida sobre la calidad de los recursos hídricos locales, lo que se traduce en un menor impacto ambiental.

Análisis económico

De acuerdo con el indicador AWP, el sistema de producción más lucrativo es la mora, ya que por cada metro cúbico de agua consumido durante su ciclo de producción se reciben alrededor de COP 3116 (Tabla 26). Por otra parte, el sistema de producción menos lucrativo fue el fríjol, que presentó una AWP de COP 1834 por cada metro cúbico de agua.

Respecto a la APL en cada ciclo productivo, las mayores ganancias por hectárea del sistema de producción fueron para la granadilla, por él se reciben alrededor de COP 20 571 429. El sistema de producción con menor APL fue el fríjol, con COP 4 692 600.

Tabla 26
Productividad aparente del agua (AWP) y productividad aparente de la tierra (APL) por sistemas de producción agrícola predominantes en las zonas de ladera de la cuenca del Río Combeima (Ibagué, Colombia)

Sistema de producción	AWP (COP/m^3)	APL (COP/ha)
Café	1956,72	10 625 000,00
Fríjol	1834,05	4 692 600,00
Granadilla	2633,99	20 571 428,57
Mora	3115,77	11 634 285,71

COP: pesos colombianos, con TRM aproximada de COP 3.000 por cada dólar estadounidense.

Los anteriores resultados permiten evidenciar que las diferencias asociadas principalmente con la productividad económica calculada de agua y tierra de los sistemas de producción dependen de los precios al productor, de las huellas y los rendimientos del agua que son específicas del territorio (Schyns & Hoekstra, 2014). Esos hallazgos coinciden con lo encontrado a nivel nacional por CTA (2013b) e internacional por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA] (2017b).

Un análisis más profundo sobre la productividad económica de los sistemas de producción implantados refleja que a pesar de no existir grandes diferencias en su AWP, sí hay gran diferencia en su APL. Los sistemas de producción que presentan una APL superior provocan que la productividad aparente del agua en la cuenca sea baja (agua verde y azul), y los sistemas de producción predominantes con menor rendimiento económico por unidad de agua (AWP) utilizada son aquellos que además presentan una HH más elevada, tal como café y fríjol.

Según García (2013), la productividad económica es influenciada directamente por la HHA debido a que los rendimientos económicos de cultivos en áreas regables son muy superiores a los de tierras cultivadas en secano y los cultivos con menor demanda de recursos hídricos por unidad de producto presentan mayor rendimiento económico. Esta situación no se presenta en las zonas de laderas del río Combeima, puesto que el café demanda más cantidad de agua verde y su productividad es menor a la de la mora, que requiere menos HHV.

Análisis social

Debido a la inexistencia de sistemas de acueducto y alcantarillado en el área de estudio no fue posible estimar el índice de riesgo de calidad del agua (IRCA). No obstante, se conoció que cerca del 10% de los predios de la zona cuentan con pozos sépticos. También se evidencia la inexistencia de sistemas de recolección de residuos generados en cada una de las etapas de los sistemas de producción, ni se presenta un manejo adecuado de estos, lo que contribuye a la generación de enfermedades asociadas a problemas respiratorios y digestivos; finalmente, tampoco se identifican zonas críticas por escasez en la oferta de agua (Guauque & Barreto, 2017). Los resultados obtenidos son similares a los encontrados por Builes (2013), quien nombra enfermedades como malaria, dengue, hepatitis y cólera en el río Porce, y si bien refiere no presentarse déficit en la disponibilidad de agua, confirma baja cobertura de acueducto y alcantarillado.

Se constata que la inequidad social en las zonas rurales genera afectaciones en los tres pilares de sostenibilidad, pero el nivel de detalle depende directamente de la gestión desarrollada en cada departamento, toda vez que para el caso puntual de Ibagué no se tienen registro del tipo de enfermedades[1].

8.3.4. Estrategia de respuesta

La siguiente propuesta de lineamientos se construyó para dar respuesta a las problemáticas identificadas a partir de los resultados sobre la evaluación de la HH para las zonas de laderas del río Combeima. Esta estrategia se realiza con el propósito de viabilizar el conocimiento, control, monitoreo y solución de ellas y mejorar las condiciones ecológicas, sociales y económicas en el territorio (Tabla 27).

1 Comunicación personal, Salazar V., Secretaría de Salud Municipal (8 de agosto de 2016).

Tabla 27
Objetivos específicos planteados para reducir la huella hídrica verde (HHV) de los sistemas de producción agrícola predominantes en zona de ladera de la cuenca del río Combeima (Ibagué, Colombia)

Objetivo	Estrategia	Línea de acción
Conocer los ecosistemas y las relaciones hidrológicas.	Conocimiento de la relación entre los ecosistemas y los procesos hidrológicos asociados a la oferta hídrica.	Realizar estudios de limnología, ecología, botánica y demás ciencias básicas, que permitan entender las interrelaciones asociadas a la salud del ecosistema.
		Ejecutar proyectos que permitan cuantificar la oferta total y disponible, como base técnica de los balances hídricos a nivel de cuenca y sus afluentes.
		Investigar cuáles son los bienes y servicios hidrológicos que prestan los ecosistemas a fin de definir aquellos que sean clave para la regulación de la oferta a nivel de cuenca y sus afluentes.
Fomentar el uso eficiente y sostenible del agua y la gestión integral del recurso hídrico por usuarios del sector agrícola.	Caracterización y cuantificación de la demanda de agua.	Caracterizar anualmente a los usuarios del recurso hídrico a nivel de afluente.
	Uso eficiente y sostenible del agua, fortaleciendo la implementación de procesos y tecnologías de ahorro y reuso.	Aumentar los sistemas agroforestales con especies nativas, que brinden protección contra la erosión hídrica y eólica.
		Aumentar la implementación de buenas prácticas de producción en el sector agropecuario.
Minimizar la contaminación del recurso hídrico.	Reducción de la contaminación del recurso hídrico orientada a combatir las principales causas y fuentes de contaminación.	Eliminar la disposición de los residuos sólidos en los cuerpos de agua de las zonas rurales, desarrollando programas enfocados a reducir, recuperar y reutilizar.
Desarrollar la gestión integral de los riesgos asociados a la oferta y disponibilidad del agua.	Formulación e implementación de programas que mitiguen la variabilidad, y adaptación al cambio climático por parte de los usuarios del recurso hídrico que resulten más expuestos a estos fenómenos naturales.	Establecer esquemas como el de pago por servicios ambientales (PSA), por conservación de área de bosques, en los sistemas de finca.
		Implementar instalaciones hidráulicas y sanitarias, como grifos y llaves en tanques, lavamanos, albercas, duchas y lavaplatos.

8.4. Conclusiones

Las zonas de laderas tienen mayor HHV debido a que el régimen de precipitación en la cuenca del río Combeima permite que la mayoría de sistemas predominantes se desarrollen bajo condiciones de no riego, además de ser sistemas secanos y no presentar huella azul.

Los resultados de la evaluación de la HH evidencian una situación límite en términos de competencia por agua verde, y la necesidad de encaminar la gestión ambiental a desincentivar el crecimiento de la frontera agrícola.

Aunque las fuentes hídricas superficiales de la zona tenían capacidad para asimilar la contaminación producida por las actividades productivas del sector agrícola, se deben realizar estudios a nivel multisectorial con visión holística de la calidad de los afluentes del río Combeima en las zonas de ladera.

8.5. Referencias

Arévalo, D., Lozano, J. G., y Sabogal, J. (2011). Estudio nacional de huella hídrica, Colombia, sector agrícola. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 7, 103-126.

Arévalo Uribe, D. (2012). *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica*. Medellín, Colombia. Recuperado de http://infoagro.net/programas/ Ambiente/pages/agricultura/casos/2.pdf

Builes. E. (2013). *Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín, Colombia.

Centro Nacional de Investigaciones del Café [Cenicafé] (2007). *Sistema de producción de café en Colombia.* H. F. Ospina (Ed.). Recuperado de http://www.cenicafe.org/es/ publications/sistemas_de_produccion.pdf

Cerdas, M., y Castro, J. (2003). *Manual práctico para la producción, cosecha y manejo de granadilla*. San José, Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería. Recuperado de http://www.mag.go.cr/bibioteca_virtual_ciencia/tec-granadilla.pdf

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia [CTA] (2013a). *Guía metodológica de aplicación de huella hídrica en cuenca*. Medellín. Recuperado de: http://www.suizaguacolombia.net/es/Inicio/media/GUIA_METODOLOGICA_HH Cuenca.pdf

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia [CTA] (2013b). *Evaluación de la huella hídrica en la cuenca del río Porce.* Medellín. Recuperado de: file:///C:/Users/lalvarez/Desktop/Rio Porce/LibroHuellahidrica.pdf

Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima], Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica], Servicio Nacional de Aprendizaje [SENA), y Universidad del Tolima (2006). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica mayor del río Coello.* Ibagué, Colombia: Cortolima.

Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima] (2009). *Estrategias de mitigación del riesgo en la cuenca del río Combeima para garantizar el abastecimiento de agua en la ciudad de Ibagué*. Ibagué: Cortolima. Recuperado de: https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/boletines/ago2012/3570.pdf

Departamento Nacional de Planeación [DNP] (2009). Documento Conpes 3570: *Estrategias de mitigación del riesgo en la cuenca del río Combeima para garantizar el abastecimiento de agua en la ciudad de Ibagué.* Bogotá: DNP. Recuperado de: http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Dourte, D. R., Fraisse, C. W., y Uryasev, O. (2014). Water Footprint on Agro-Climate: A dynamic, web-based tool for comparing agricultural systems. *Agricultural Systems,* 125, 33-41. Recuperado de http://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.11.006

Encuesta Nacional Agropecuaria [ENA] (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ ENA_ 2014.pdf

García, A. (2013). *La huella hídrica como indicador de presiones: aplicación a la cuenca del Duero y al sector porcino español* (Tesis Doctoral). Universidad de Henares, Facultad de Biología, Ciencias Ambientales y Química, Departamento de Química Analítica, Química Física e Ingeniería Química.

García Morillo, J., Rodríguez Díaz, J. A., Camacho, E., y Montesinos, P. (2014). Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production*, *87*, 594-602. Recuperado de http://doi.org/10.1016/ j.jclepro.2014.09.043

Grijalba, C., Calderón, L., y Pérez, M. (2010). Rendimiento y calidad de la fruta en mora de castilla (*Rubus glaucus* Benth), con y sin espinas, cultivadas en campo abierto en Cajicá (Cundinamarca), s. d.

Guauque, D. E., y Barreto, L. E. (2017). *Evaluación del impacto ambiental de los sistemas predominantes de producción agropecuaria en la microcuenca La*

Plata, Ibagué - Tolima. Ibagué: Universidad del Tolima. Recuperado de: http://repository. ut.edu.co/handle/001/136/browse?type=author&order =ASC&rpp=20&starts_with= guaque

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., y Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. Earthscan (Ed.) (p. 228). Londres.

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA] (2011). *Manejo fitosanitario del cultivo de mora (Rubus glaucus* Benth*). Medidas para la temporada invernal*. Bogotá: ICA. Recuperado de: http://www.ica.gov.co/getattachment/b7e061eb-ebd3-4f80-9518-c771712405eb/-nbsp%3BManejo-fitosanitario-del-cultivo-de-la-mora.aspx

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA] (2017). *Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica*. (R. Cascante, Ed.). San José, Costa Rica: IICA. Recuperado de: https://euroclima.iica.int/sites/default/files/Documento Final. Guía Metodológica de la HH.pdf

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA] (2017b). *Evaluación de la huella hídrica en cuencas hidrográficas: experiencias piloto en Latinoamérica.* (R. C. Ocampo, Ed.). San José, Costa Rica: IICA. Recuperado de: http://www.iica.int/es/publications/evaluación-de-la-huella-hídrica-en-cuencas-hidrográficas-experiencias-piloto-en

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia [Ideam] (2010). *Estimación de la demanda de agua. Estudio Nacional del Agua 2010.* Bogotá: Ideam.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam] (2015). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá: Ideam.

Leonel, H. F., Páez, L. A., y Pérez, F. A. (2000). *Imagen ambiental actual de la cuenca alta del río Combeima. Estudio regional de su configuración espacial con fines de planificación y manejo ambiental* (Tesis de Maestría en Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas). Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal, Ibagué, Colombia.

Liu C., Kroeze, C., Hoekstra, A. Y., y Gerbens-Leenes, W. (2012). Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Ecological Indicators, 18*(0), 42-49.

Lozano, D., & Cortés, N. (2016). Evaluación de la Huella Hídrica del proceso productivo del arroz (Oryza sativa) en el municipio del Espinal – Tolima y su incidencia ambiental en el área de influencia. (Tesis de pregrado)

Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle, Bogotá DC. Recuperado de: http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/20481/41101223_2017.pdf?sequence=1

Movilla, B., Gonzáles, A., y Marulanda, E. (s. f.). *Necesidades hídricas de dos variedades de fríjol* (Phaseolus vilgaris *L.*) *en condiciones de invernadero.* Palmira, Colombia: Universidad de Palmira.

Muñoz, J., Guío, A., Andrade, H., *et al.* (2014). *Esquema de pago por servicios ambientales para la cuenca alta del río Combeima en el municipio de Ibagué (Tolima, Colombia).* Convenio de Cooperación núm. 022 de 2013 celebrado entre Patrimonio Natural Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas, y la Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal. Ibagué, Colombia.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2010). *CropWat 8.0.* Roma: FAO. Recuperado de: http://www.fao.org/nr/water/ inforesdatabasescropwat.html

Ridoutt, B. G., y Pfister, S. (2013). A New Water Footprint Calculation Method Integrating Consumptive And Degradative Water Use Into A Single Stand-Alone Weighted Indicator. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 18*(1), 204-207. Recuperado de https://doi.org/10.1007/s11367-012-0458-z

Rodríguez Ortiz, C. M. (s. f.). *Análisis de la disponibilidad de agua verde a partir del ajuste del cálculo de la evapotranspiración en zonas de vegetación natural.* Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Recuperado de http://www.bdigital.unal.edu.co/53836/1/43978122.2016.pdf

Samoral, G., Dumont, A., Aldaya, M. M., Rodríguez-Casado, Garrido, A., y Llamas, M. R. (2011). *Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir*. Fundación Botín - Observatorio del Agua.

Schyns, J. F., y Hoekstra, A. Y. (2014). The added value of water footprint assessment for national water policy: a case study for Morocco. *PLoS One, 9*(6), e99705.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADR] (2014). *Manual técnico del cultivo de mora bajo buenas prácticas agrícolas*. Medellín, Colombia: Francisco Vélez Producción Gráfica.

Servicio Agrícola y Ganadero [SAG] (2013). *El cultivo del fríjol.* En M. Villeda (Ed.), *Hacienda* (III, vol. 16, p. 44). Tegucigalpa, Honduras. Recuperado de: http://www.agronegocioshonduras.org/wpcontent/uploads/2014/06/el_cultivo_de_ frijol_dicta.pdf

Sevilla, J. C. (2015). *Huella hídrica del Perú (sector agropecuario)*. Lima. Recuperado de http://www.ana.gob.pe/media/1256542/estudio huella hídrica nacional.pdf

Rodrigues da Silva, V. de P., Farias Bem Maracajá, K., Araújo, L. E. de, Dantas Neto, J., de Oliveira Aleixo, D., y Baracuy da Cunha Campos, J. H. (2009). Pegada hídrica de indivíduos com diferentes hábitos alimentares. Revista *Ambiente & Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 4*(2), 57-65. Recuperado de http://doi.org/10.4136/1980-993X

Tolón, A., Lastra, X. B., y Fernández, V. J. (2013). Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. *Revista electrónica de medio ambiente,* 56-86.

Torstensson, L. (1990). *Plaguicidas en el ambiente externo. Ocurrencia, propagación, efectos*. Revisión de la literatura y propuestas de investigación. Naturvårsverket report 3536. Solan, Suecia. (Según información del WWF, 1992).

Universidad del Tolima (2003). *Proyectos de servicios integrados para jóvenes del cañón del Combeima. Convenio de apoyo y cooperación interinstitucional entre la Universidad del Tolima y el proyecto de servicios integrados para jóvenes – subproyecto municipal del municipio de Ibagué, Colombia.* Recuperado de http://desarrollo.ut.edu.co/tolima/hermesoft/portal/home_1/rec/arc_6765.pdf

Villalba, R., Gómez, J., y Parra, M. (2006). *Manual técnico de cultivo de granadilla (Passiflora liguraris Juss) en el departamento del Huila.* Neiva, Colombia: Secretaría Técnica Cadena Productiva de Frutas.

World Wildlife Fund [WWF] (2012). *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica: Reporte Colombia 2012*. Recuperado de http://infoagro.net/ programas/ambiente/pages/agricultura/casos/2.pdf

Esta edición consta de 300 ejemplares,
en su composición se utilizaron
caracteres Minion Pro 11/13,5 puntos,
formato de 16,5 x 24 centímetros,
páginas interiores en esmaltado G.art 115 grs
y carátula en propalcote C2S 300 grs.
Se imprimió en enero de 2019
en los talleres de Panamericana Formas e Impresos S.A.
Bogotá, D. C., Colombia